**Deutscher Bundestag** **Drucksache 14/8959**
**14. Wahlperiode** 02. 05. 2002

# Bericht

## des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (19. Ausschuss) gemäß § 56a der Geschäftsordnung

### Technikfolgenabschätzung

### hier: Monitoring „Kernfusion“

Inhaltsverzeichnis

| | | Seite |
|---|---|---|
| **Vorwort des Ausschusses** | | 3 |
| **Zusammenfassung** | | 4 |
| **I.** | **Einleitung** | 7 |
| **II.** | **Was ist Kernfusion?** | 8 |
| 1. | Geschichtlicher Abriss | 8 |
| 2. | Stand der Forschung | 9 |
| 3. | Wissenschaftlich-technische Herausforderungen | 10 |
| 3.1 | Physik des brennenden Plasmas | 10 |
| 3.2 | Kernfusions-Technologie | 10 |
| 3.3 | Optimierung des magnetischen Einschlusses | 11 |
| 3.4 | Niedrig aktivierbare reaktortaugliche Materialien | 11 |
| 4. | Technische Realisierbarkeit von Fusionskraftwerken | 11 |
| **III.** | **Was kostet die Fusionsforschung?** | 11 |
| 1. | Forschungsförderung weltweit | 11 |
| 1.1 | Europäische Union | 12 |
| 1.2 | Deutschland | 12 |
| 2. | Investitionen in Forschungsanlagen | 13 |
| **IV.** | **Brauchen wir Kernfusion?** | 13 |
| 1. | Längerfristige Entwicklung der Energiesituation | 13 |
| 1.1 | Langfristszenarien zur Entwicklung des Energiebedarfs und der eingesetzten Energieträger | 13 |
| 1.2 | Option Kernfusion | 17 |
| 2. | Kernfusion und Klimaschutz | 18 |
| **V.** | **Ist Kernfusion sicher?** | 19 |

Seite

1. Mögliche Unfälle . . . 19
2. Gewaltsame Einwirkungen Dritter . . . 19
3. Weiterverbreitung von Kernwaffen . . . 19
3.1 Tritium . . . 19
3.2 Spaltbare Materialien . . . 20

**VI. Ist Strom aus Kernfusion wirtschaftlich?** . . . 20

**VII. Ist Strom aus Kernfusion umweltfreundlich?** . . . 21

1. Radioaktivität . . . 21
1.1 Aktivierungsprodukte . . . 21
1.2 Tritium . . . 22
1.3 Radiologische Emissionen im Normalbetrieb und bei der Stilllegung . . . 22
2. Ressourcenverbrauch . . . 23
2.1 Brennstoffe . . . 23
2.2 Anlage . . . 23
3. Weitere Umweltauswirkungen . . . 23
3.1 Emissionen von Schadstoffen . . . 24
3.2 Entsorgung nicht radioaktiver Abfälle aus Fusionsanlagen . . . 24
3.3 Entsorgung von Abfällen mithilfe von Fusionsanlagen . . . 24

**VIII. Ist Kernfusion sozial nachhaltig?** . . . 24

1. Gerechtigkeit zwischen Generationen . . . 24
2. Verteilung von Ressourcen zwischen Optionen . . . 24
3. Gerechtigkeit zwischen Regionen . . . 25
4. Vermeidung von Konflikten . . . 25
5. Akzeptanz . . . 25

**IX. Was tun?** . . . 26

1. Option „Kontinuierliche Fortsetzung“ . . . 26
2. Option „Gründliche Evaluation“ . . . 26
3. Option „Neuausrichtung“ . . . 27

**Literatur** . . . 28

1. In Auftrag gegebenes Gutachten . . . 28
2. Weitere Literatur . . . 28

**Anhang** . . . 31

1. Tabellenverzeichnis . . . 31
2. Abbildungsverzeichnis . . . 31
3. Parlamentarische Anhörung . . . 31
4. Expertengespräche . . . 31

**Glossar** . . . 32

## Vorwort des Ausschusses

Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung hat das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) beauftragt, den aktuellen Entwicklungsstand und die langfristigen Realisierungsmöglichkeiten der Fusionstechnologie als Energiequelle darzustellen.

Der Bericht stellt in gut verständlicher Form die kontroverse Diskussion, die technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und sicherheitsrelevanten Aspekte der komplexen wissenschaftlich-technischen Materie dar und leitet daraus politische Handlungsoptionen ab.

Die Ergebnisse der Anhörung zur Kernfusion des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung vom 28. März 2001 sind in den Sachstandsbericht eingeflossen.

Berlin, den 26. April 2002

**Der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung**

Ulrike Flach
Vorsitzende und Berichterstatterin

Ulla Burchardt
Berichterstatterin

Axel E. Fischer
Berichterstatter

Hans-Josef Fell
Berichterstatter

Angela Marquardt
Berichterstatterin

## Zusammenfassung

### Ausgangssituation und Entscheidungsbedarf

Die Entwicklung der Fusionstechnologie als Energiequelle stellt ein historisch einzigartiges Unterfangen dar. Zwischen der Entdeckung ihrer physikalischen Funktionsmechanismen und der möglichen Verfügbarkeit kommerziell nutzbarer Kraftwerke wird voraussichtlich ein ungewöhnlich langer Zeitraum von etwa 100 Jahren intensiver Forschung und Entwicklung liegen. Ob die Fusionsforschung sich gegenwärtig noch eher im Stadium der Grundlagenforschung oder bereits im Stadium der Entwicklung einer Energietechnologie befindet, lässt sich daher nicht klar sagen.

Fusionsexperimente weisen zunehmend große räumliche Ausmaße und eine hohe technische Komplexität auf, die einen erheblichen finanziellen Aufwand bedingen. Aufgrund dieser Rahmenbedingungen besteht eine besonders intensive und stabile internationale Zusammenarbeit. Der hohe Ressourceneinsatz und die sehr lange Zeitspanne bis zu einer möglichen Realisierung mit den dadurch verursachten außerordentlich großen Unsicherheiten der Beurteilung führen zu einer erheblichen Komplexität der anstehenden Entscheidungen.

Die Community der Fusionsforscher ist der Ansicht, dass das Reaktor-orientierte Forschungsprogramm fortgeführt werden sollte, um über zwei Zwischenschritte, ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) und DEMO (Demonstration Fusion Powerplant), den Bau eines ersten kommerziellen Fusionsreaktors für etwa das Jahr 2050 vorzubereiten. Bei ITER, über den weit reichende Entscheidungen anstehen, handelt es sich um ein partnerschaftliches Unternehmen der Europäischen Union, Japans und Russlands unter Beteiligung weiterer Staaten. Parallel zu ITER ist der Bau einer speziellen hochintensiven Fusionsneutronenquelle erforderlich, um niedrig aktivierbare Materialien zu entwickeln und zu testen. DEMO soll die technische Machbarkeit eines Fusionskraftwerks beweisen und erstmals elektrischen Strom im Dauerbetrieb erzeugen.

Um dieses Programm zu realisieren, sind ganz erhebliche wissenschaftlich-technische Herausforderungen zu bewältigen. Der hierfür notwendige Forschungs- und Entwicklungsprozess wird sich über mehrere Jahrzehnte erstrecken und den Einsatz von Fördermitteln in großem Maßstab erfordern. In der fast 50-jährigen Geschichte der Fusionsforschung wurden die Schwierigkeiten für die Entwicklung eines Fusionskraftwerkes unterschätzt, sodass der Realisierungshorizont weiter in die Zukunft gerückt werden musste und quasi zu einem „Moving Target“ wurde.

Die Kernfusion stellt auch für Technikfolgenabschätzung eine besondere Herausforderung dar. Prognosen über Technikfolgen der Fusion in mehr als 50 Jahren sind außerordentlich schwierig und bedürfen einer sorgfältigen Interpretation. Sie sind in der Regel nicht mehr als heuristische Anhaltspunkte, welche Hinweise geben können, worauf im weiteren Entwicklungsprozess der Fusion besonders zu achten ist. Methodisch erschwert wird die Beurteilung dadurch, dass die Qualität der von der Fusionsforschung angegebenen Zahlen angesichts von möglicherweise darin enthaltenen Wunschvorstellungen und der Unmöglichkeit, „unabhängiges“ Know-how zu finden, nur sehr schwierig zu beurteilen ist.

### Was kostet die Fusionsforschung?

In den letzten 30 Jahren wurden erhebliche öffentliche Mittel in die Förderung der Plasmaforschung investiert. In der Europäischen Union wurden bis Ende der 90er-Jahre nahezu 10 Mrd. Euro für die Fusionsforschung aufgewendet. In Deutschland wurden in den letzten Jahren im Mittel etwa jährlich 130 Mio. Euro aus Bundesmitteln in die Fusionsforschung investiert. Zum Vergleich: Die FuE-Aufwendungen des Bundes für Erneuerbare Energien und rationelle Energieverwendung betrugen im Jahr 2000 153 Mio. Euro. Bis zur möglichen Realisierung der Stromerzeugung durch Kernfusion müsste nach heutiger Schätzung die Forschung und Entwicklung noch einmal über 50 Jahre in einem Umfang von insgesamt etwa 60 bis 80 Mrd. Euro – davon innerhalb der Europäischen Union 20 bis 30 Mrd. Euro – gefördert werden. ITER wurde von zunächst 7 auf 3,5 Mrd. Euro redimensioniert, die sich voraussichtlich über zehn Jahre verteilen werden. Über die Durchführung von ITER, den eventuellen Standort und die Verteilung dieser Summe auf die beteiligten Länder ist im nächsten Jahr zu entscheiden.

### Brauchen wir Kernfusion?

Die Argumente für die Nutzung von Fusionsenergie sind im Wesentlichen von Vorsorgeüberlegungen bestimmt: einerseits zur langfristigen Absicherung gegenüber Energieknappheit angesichts der Erschöpfung der fossilen Energieträger, und andererseits zur Begrenzung der Klimaveränderung durch die Vermeidung von Treibhausgasemissionen. Ausgangspunkt ist die – noch unbewiesene – Annahme, dass ab Mitte des 21. Jahrhunderts Fusionskraftwerke kommerziell verfügbar wären.

Alle globalen Energieszenarien gehen von einem weiter steigenden Energiebedarf aus. Danach wird der weltweite Bedarf an Primärenergie bis zum Jahr 2050 auf das Zwei- bis Dreifache des Wertes von 1990 zunehmen. Mit Energiesparmaßnahmen kann diese Entwicklung höchstens gebremst werden. Klimaschutzaspekte erfordern vielmehr langfristig einen Ausstieg aus der Nutzung fossiler Energieträger. Dies ist auch sinnvoll aus der Nachhaltigkeitsperspektive, weil die begrenzten fossilen Ressourcen dann für andere Nutzungen erhalten blieben.

Mitte des 21. Jahrhunderts werden voraussichtlich überwiegend die gleichen Energieträger wie heute eine Rolle bei der Energieversorgung spielen, wenn auch in anderer Zusammensetzung. Die durch die Verknappung der fossilen Energieträger und den steigenden Weltenergiebedarf entstehende Lücke in der Energieversorgung wird in vielen Energieszenarien im Wesentlichen durch regenerative Energieträger geschlossen. Nicht ableitbar aus diesen Szenarien ist, inwieweit der geplante progressive Ausbau der Erschließung und Nutzung regenerativer Energie-

quellen, kombiniert mit der Ausschöpfung vorhandener Energieeinsparpotenziale, in der Praxis bis zum Jahre 2050 auch greift. Offen bleibt auch, inwieweit Versorgungsengpässe fossiler Energieträger hierbei eine Rolle spielen werden.

Regenerative Energieträger und Kernfusion werden für 2050 daher oft in einer gewissen Konkurrenz zueinander diskutiert. Gemeinsam ist beiden Optionen eine $CO_2$-freie Umwandlung von Energie und ihre Zuordnung zu den so genannten „Zukunftstechnologien“, sodass sie prinzipiell Bausteine für eine von fossilen Energieträgern unabhängige Energieversorgung darstellen. Es ist durchaus eine Koexistenz beider Optionen der Energiebereitstellung denkbar, etwa aus Klimaschutzgründen oder aus Sicht einer angestrebten Versorgungssicherheit mit einer entsprechend verfügbaren Technologievielfalt. Auch im Hinblick auf die Art der Anlagen liegt vielfach eine Komplementarität vor: Fusionskraftwerke wären als zentrale großtechnische Anlagen vor allem zur Sicherung der Grundlast in urbanen Regionen geeignet. Sie würden sich z. B. gut in die künftigen Versorgungsinfrastrukturen der zurzeit auf Steinkohle setzenden Länder (z. B. China, Indien) einpassen. Regenerative Energieträger hingegen werden eher in dezentralen kleineren Einheiten realisiert.

Ein erheblicher Vorteil der Energiegewinnung durch Kernfusion liegt, wie gesagt, darin, dass beim Fusionsprozess keine klimaschädigenden Treibhausgase entstehen. Eine funktionierende Fusionstechnologie wäre daher geeignet, in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts einen Beitrag zur Vermeidung von Klimaveränderungen zu leisten. Sie kann hierzu allerdings nicht kurz- oder mittelfristig beitragen. Höhe und Umsetzungsgrad von Umwelt- und Klimaschutzzielen üben dabei einen signifikanten Einfluss auch auf die Struktur der Energieversorgung im Jahre 2050 aus: Werden diese Ziele vergleichsweise hoch gewichtet, müssten Fusionskraftwerke in einem Umfeld positioniert werden, welches wahrscheinlich durch die intensive Nutzung erneuerbarer Energieträger und einen geringer ausfallenden Energiebedarf gekennzeichnet ist. Dann würden zum Energiemanagement eher schnell regelbare Kraftwerke benötigt. Fusionskraftwerke – eher auf einen gleichmäßigen Dauerbetrieb ausgelegt – würden diese Funktion kaum erfüllen können. Bei vergleichsweise geringer Gewichtung dieser Ziele würde sich eher ein Bedarf an preisgünstigen (neuen) Energiequellen bei wachsender Energienachfrage einstellen. Mit $CO_2$-frei erzeugtem Kernfusionsstrom wären dann zwar zusätzlich große Energiemengen bereitstellbar, allerdings wäre dieser nach heutigem Erkenntnisstand nicht konkurrenzfähig.

Momentan zeichnet sich keine klare technische Entwicklungslinie ab, welche Energieumwandlungstechnik(en) in 50 Jahren eine dominierende Rolle spielen wird (werden) (z. B. Brennstoffzelle, Wasserstofftechnologie oder Kernfusion). Kernfusion stellt eine unter zahlreichen Optionen für die künftige Energieversorgung dar, deren Nutzung einer zusätzlichen Möglichkeit entspricht, Grundlaststrom zu erzeugen, und die sich eher für die Versorgung von stark urbanisierten Regionen eignet. Entscheidend für eine weitere Verfolgung der Option Kernfusion ist nicht deren immenses quantitatives Potenzial der Energiebereitstellung, sondern die gewählte Strategie zur Energieversorgung im Jahre 2050. Kernfusion kommt vor allem als Vorsorgeoption für eine fernere Zukunft, in der Reserven und Ressourcen fossiler Energieträger weitgehend erschöpft sind, in Betracht. Sie könnte zu einem Energiemix beitragen, der robust gegenüber unterschiedlichen politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen ist.

**Ist Kernfusion sicher?**

Fusionsreaktoren sollen inhärent sicher sein. Ein wesentlicher Unterschied zu Spaltungsreaktoren besteht darin, dass unkontrollierte nukleare Kettenreaktionen in Fusionskraftwerken naturgesetzlich ausgeschlossen sind. Katastrophale Unfallszenarien sind dennoch nicht auszuschließen. Welche Art von Unfällen mit welcher Wahrscheinlichkeit eintreten könnten und in welchem Umfang das radioaktive Inventar in diesem Fall freigesetzt werden könnte, ist umstritten, weil dabei Annahmen zum Reaktordesign gemacht werden müssen. Dass das Ziel der inhärenten Sicherheit erreicht werden kann, ist zurzeit weder eindeutig bewiesen noch klar widerlegt, sondern hängt von den Ergebnissen einer noch über Jahrzehnte zu leistenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit ab.

Bei der Zerstörung eines Fusionskraftwerks durch kriegerische Ereignisse oder Terrorismus würde voraussichtlich ein erheblicher Teil des radio- und chemotoxischen Inventars freigesetzt. Wird angenommen, dass der leicht mobilisierbare Tritiumanteil in einem Fusionskraftwerk durch gewaltsame Einwirkung vollständig freigesetzt wird, wären Evakuierungen der Bevölkerung auf einigen Quadratkilometern Fläche erforderlich.

Tritium ist von besonderer Bedeutung für die Weiterentwicklung der Kernwaffenarsenale, weil es in verschiedenen fortgeschrittenen Kernwaffendesigns eingesetzt wird. Es hat aber auch Bedeutung für die Weiterverbreitung von Kernwaffen. Tritium stellt daher ein wesentliches Proliferationsrisiko beim Betrieb von Fusionsreaktoren dar. Das Risiko der Erbrütung waffenfähiger spaltbarer Materialien ist jedoch insgesamt bei einem reinen Fusionsreaktor eher niedriger als bei einem Spaltreaktor.

**Ist Strom aus Kernfusion wirtschaftlich?**

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Fusionsstrom gegenüber konkurrierenden Energieträgern und die Nennung von Stromgestehungskosten sind höchst spekulativ. Alleine die Geschwindigkeit des technologischen Fortschrittes und die Kostenentwicklung bei konkurrierenden, z. B. regenerativen Energiesystemen, die von immenser Bedeutung für deren Konkurrenzfähigkeit ist, entziehen sich der langfristigen Vorhersagbarkeit. Als sicher gilt, dass die Investitionen gegenüber den Betriebskosten die Stromgestehungskosten dominieren werden. Für eine Anlage mit 1 000 $MW_e$ werden 5 bis 6 Mrd. Euro angegeben. Fusionskraftwerke werden damit sehr kapitalintensive Großprojekte sein. Sie werden sich daher hauptsächlich

für die zentralisierte Stromerzeugung in der Grundlast eignen. Selbst die Befürworter der Kernfusion gehen davon aus, dass die Stromgestehungskosten aus heutiger Sicht eher höher als bei konkurrierenden Technologien liegen werden.

Wenn der gegenwärtige weltweite Trend zur Liberalisierung der Energiemärkte anhält, wäre die hohe Kapitalintensität ein gewichtiger Nachteil für Fusionskraftwerke, da lange Kapitalbindungen in einem liberalisierten Umfeld nicht vorteilhaft sind. Dazu kommt, dass Fusionskraftwerke am Anfang mit zumindest teilweise bereits abgeschriebenen Reaktoren, die zu Grenzkosten produzieren können, zu konkurrieren hätten. Energieversorgungsunternehmen werden Fusionskraftwerke nur dann annehmen, wenn sie einen eindeutigen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber etablierten Technologien erwarten lassen einschließlich eines Risikoaufschlages wegen der noch unbekannten Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit einer jungen Technologie. Insgesamt ist daher umstritten, ob auf DEMO bereits Fusionskraftwerke folgen können, die wirtschaftlich konkurrenzfähig betrieben werden können. Möglicherweise werden Anfangsschwierigkeiten eine weitere staatliche Unterstützung erforderlich machen. Die hohe Kapitalintensität von Fusionskraftwerken wäre insbesondere für den Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern ein bedeutendes Hindernis.

**Ist Strom aus Kernfusion umweltfreundlich?**

Die gesellschaftliche Akzeptanz der Fusionstechnologie wird in hohem Maße davon abhängen, dass Umweltkriterien zum Zeitpunkt der Technologieentscheidungen angemessen berücksichtigt werden. Ein erheblicher Umweltvorteil der Fusionstechnologie liegt darin, dass beim Betrieb keine klimaschädigenden Treibhausgase entstehen.

Auf der anderen Seite stellen die in den Reaktoren erzeugten radioaktiven Abfälle sicherlich das radiologische Hauptproblem bei der Kernfusion dar. Wie diese zu bewerten sein werden hängt vom Erreichen anspruchsvoller Ziele bei der Weiterentwicklung der Technologie und der verwendeten Materialien in den nächsten Jahrzehnten ab. Das zweite wesentliche radiologische Risiko ist der Brennstoff Tritium. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften ist der Umgang mit diesem Stoff nicht unproblematisch. Tritium ist sehr mobil und daher im Fall einer Freisetzung schwer beherrschbar. Für den Tritium-Einsatz in Fusionskraftwerken sind noch zahlreiche Fragen zu klären und technische Fortschritte in der Verfahrenstechnik erforderlich (Tritiumanalytik, Verfahren zur Dekontamination tritiumhaltiger Oberflächen und Kühlwasser).

Die Ressourcensituation ist im Wesentlichen unproblematisch. Die heute bevorzugten Fusionsbrennstoffe, Deuterium und Tritium, das aus Lithium gewonnen wird, sind weltweit in großen Mengen vorhanden. Deuterium kann durch Elektrolyse aus Meerwasser extrahiert werden. Die entsprechenden Techniken sind bereits in größerem Maßstab erprobt. Tritium kommt in der Natur nur in geringsten Mengen vor und wird daher mithilfe von Neutronenstrahlung aus Lithium gewonnen, wobei zusätzlich Helium entsteht. Da die Fusionsenergie im Brennstoff in hoher Dichte gespeichert ist, sind kaum Transporte erforderlich. Die Mengen an Deuterium und Lithium, die jährlich für ein 1 000-$MW_e$-Fusionskraftwerk benötigt würden, könnten in einem einzigen Lastwagen angeliefert werden. Dabei werden keine radioaktiven Substanzen transportiert.

**Ist Kernfusion sozial nachhaltig?**

Durch Erschließung einer praktisch unerschöpflichen Energiequelle und die universelle Verfügbarkeit ihrer Brennstoffe ist Kernfusion geeignet, soziale Konflikte um Ressourcen zu vermeiden. Zudem trägt die ausgeprägte grenzüberschreitende Kooperation bei der Fusionsforschung zur internationalen Verständigung bei.

Dagegen lösen Großprojekte tendenziell in der Öffentlichkeit eher Skepsis aus. Fusionskraftwerke könnten auch deswegen auf Akzeptanzprobleme stoßen, weil sie ein wesentliches radioaktives Inventar enthalten und Endlager für radioaktive Abfälle erforderlich machen.

Die Energiegewinnung durch Kernfusion wird nur dann Akzeptanz in der Bevölkerung erlangen, wenn sie den Bedürfnissen und Anliegen der Gesellschaft entspricht. Reine Informations- oder Werbemaßnahmen für Zwecke der Akzeptanzbeschaffung haben sich im Wesentlichen als ungeeignet erwiesen. Zur Vermeidung von Akzeptanz- und Vertrauenskrisen ist ein frühzeitiger intensiver und ergebnisoffener Dialog zwischen Wissenschaft, Interessengruppen und der Öffentlichkeit erforderlich.

**Was tun?**

Trotz der Wissensdefizite und der Bewertungsprobleme in diesem speziellen Fall besteht kein Grund, die Entwicklung der Fusionsenergie sich selbst zu überlassen. Zwar ist in vielen Fragen heute nicht verlässlich zu beurteilen, ob und inwieweit die Fusionsenergie den vielen Facetten des Nachhaltigkeitspostulates entspricht. Es ist aber möglich, bereits gegenwärtig entsprechende Anforderungen zu formulieren und die Bedingungen zu erkennen, unter denen Fusionsentwicklung diesen Postulaten entsprechen kann. Dann wiederum kann über Gestaltungspotenziale der Fusion aus gesellschaftlicher Sicht nachgedacht werden: Durch welche steuernden Eingriffe kann die Entwicklung so beeinflusst werden, dass diese Bedingungen realisiert werden? Es sind aus dieser Sicht folgende generelle Handlungsoptionen der Forschungspolitik möglich. Der Sinn der Optionen ist es, den gesamten Möglichkeitsraum für politische Gestaltung aufzuspannen. Die konkrete Positionierung in diesem Möglichkeitsraum ist der politischen Bewertung und Entscheidung vorbehalten.

Option „Kontinuierliche Fortsetzung“: Weitere intensive Forschung mit den bestehenden, im Wesentlichen den Vorstellungen der Fusionsforschungs-Community folgenden Schwerpunkten. Diese Option würde der Eigendynamik des Forschungsfeldes folgen.

Option „Gründliche Evaluation“: Umfassende Evaluation des Themenfeldes Kernfusion unter Einbeziehung von externem Sachverstand, mit Kriterien nachhaltiger

Energieversorgung als Leitlinie. Daraus resultierende Gestaltungsanforderungen könnten in die weitere Technologieentwicklung integriert werden. Hier würde die Eigendynamik möglicherweise aufgebrochen, bis hin zur Formulierung von Umsteuerungs- oder Abbruchkriterien, falls es bei dem Phänomen des „Moving Target“ bleibt.

Option „Neuausrichtung“: Ausrichtung auf die schnellstmögliche Entwicklung der Kernfusion als Energietechnologie auf dem TOKAMAK-Pfad aktiv beenden und auf ein Forschungsprogramm mit dem Fokus eines breiter angelegten Verständnisses der wissenschaftlichen Grundlagen und alternativer Einschlusskonzepte zurückführen. Hiermit würde ein Abbruch der Eigendynamik des Forschungsbereiches forciert.

Zentrale Herausforderung bleibt, unabhängigen Sachverstand aufzubauen, und einen breiten gesellschaftlichen Diskurs zu organisieren. Dies ist, angesichts der Schwierigkeit, dass eine direkte Betroffenheit in der Gesellschaft aufgrund der zeitlichen Ferne und der Lebensweltferne der Fusion kaum festzustellen ist, keine einfache Aufgabe.

## I. Einleitung

Der weltweite Energieverbrauch ist in den vergangenen Jahrzehnten stark angestiegen und wird bisher überwiegend durch fossile Energieträger gedeckt. Die Erschöpfung dieser Ressourcen ist absehbar. Zudem wird bei der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas das Klimagas Kohlendioxid freigesetzt. Ob die Strategie-Optionen „Forcierte Energieeinsparungen und rationellere Energienutzung“ und „Verstärkter Einsatz regenerativer Energieträger“ mittel- und langfristig ausreichen, um eine Energieversorgung zu gewährleisten, die den Kriterien einer Nachhaltigen Entwicklung gerecht wird, ist noch nicht zweifelsfrei geklärt.

Vor diesem Hintergrund erscheint die Kernfusion als eine interessante technische Option: Sie erzeugt kein Kohlendioxid, das radiologische Gefährdungspotenzial liegt deutlich unter demjenigen eines Spaltreaktors und die heute favorisierten Ausgangsmaterialien – schwerer Wasserstoff und Lithium – sind in großen Mengen verfügbar.

Andererseits werden jedoch Bedenken vorgebracht: Die technische Realisierbarkeit stromerzeugender Fusionsreaktoren ist noch nicht nachgewiesen. Es besteht ein enormer Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowohl beim Verständnis grundlegender Mechanismen als auch z. B. im Bereich niedrig aktivierbarer und unter extremsten Bedingungen kaum versprödender Materialien. Die Community der Fusionsforschenden rechnet heute mit dem Einsatz kommerzieller Fusionskraftwerke ab der Mitte dieses Jahrhunderts. Es stellt sich die Frage, welchen Beitrag die Kernfusion unter diesen Voraussetzungen zur Lösung der Treibhaus-Problematik leisten kann.

Die Entwicklung der Fusionstechnologie als Energiequelle stellt in vielerlei Hinsicht ein historisch einzigartiges Unterfangen dar. Zwischen der Entdeckung ihrer physikalischen Funktionsmechanismen und der möglichen Verfügbarkeit kommerziell nutzbarer Kraftwerke wird voraussichtlich ein ungewöhnlich langer Zeitraum von etwa 100 Jahren intensiver Forschung und Entwicklung liegen. Ob die Fusionsforschung sich gegenwärtig noch eher im Stadium der Grundlagenforschung oder bereits in der Entwicklung einer Energietechnologie befindet, lässt sich daher nicht klar sagen.

In der fast 50-jährigen Geschichte der Fusionsforschung wurden die Schwierigkeiten für die Entwicklung eines Fusionskraftwerkes unterschätzt, sodass der Realisierungshorizont weiter in die Zukunft gerückt werden musste und quasi zu einem „Moving Target“ wurde. So wurde um 1960 die Einführung der Fusionstechnologie in „ein bis zwei Jahrzehnten“ vorhergesagt, noch im Jahr 1990 setzte das US Department of Energy das Jahr 2025 als Ziel für die kommerzielle Stromerzeugung.

Fusionsexperimente weisen zunehmend große räumliche Ausmaße und eine hohe technische Komplexität auf, die einen erheblichen finanziellen Aufwand bedingen. Der geplante Versuchsreaktor ITER[1] ist das weltweit zweitgrößte Forschungsprojekt nach der Internationalen Raumstation ISS. Da die hierfür benötigten Mittel von einem Land alleine kaum aufzubringen sind, zeichnet sich die Fusionsforschung durch eine besonders intensive internationale Zusammenarbeit aus. Im Zusammenhang mit dem internationalen Großprojekt ITER besteht zurzeit konkreter politischer Entscheidungsbedarf, insbesondere was den Stellenwert der Fusionsforschung im 6. Forschungsrahmenprogramm der EU anbelangt.

Vor diesem Hintergrund beauftragte der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages auf Antrag der Fraktion Bündnis 90/Die Grünen das TAB, einen Sachstandsbericht zum Thema „Kernfusion“ zu erstellen. Hierin sollen der derzeitige Stand und die absehbare Entwicklung der Kernfusion als zukünftige Energiequelle und damit zusammenhängende Fragestellungen untersucht und in einfacher und verständlicher Form dargestellt werden.

Um dieser Zielsetzung bei der vergleichsweise komplexen wissenschaftlich-technischen Materie gerecht werden zu können, ist der Bericht nach konkreten „einfachen“ Leitfragen – z. B.: Was ist Kernfusion? Was kostet die Fusionsforschung? Brauchen wir Kernfusion? – gegliedert.

Bei der Beantwortung dieser Fragen sind vor allem zwei Herausforderungen zu bewältigen. Zum einen sind auf Grund des sehr langen Zeithorizontes von 50 Jahren Extrapolationen, die erheblich über den gesicherten Stand der Erkenntnis hinausgehen, erforderlich. Auf die damit verbundenen Unsicherheiten wird im Bericht an entsprechender Stelle dezidiert hingewiesen, um nicht eine Verlässlichkeit zu suggerieren, die auf der Grundlage von 50-Jahres-Prognosen nicht erreichbar ist.

Zum anderen stammt der überwiegende Teil der Veröffentlichungen zum Thema von Experten aus der

[1] Hier und im Folgenden ist mit ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) das redimensionierte Projekt ITER-FEAT gemeint.

Community der Fusionsforschenden, die eine Förderung der Kernfusion befürworten. „Unabhängige“ Experten mit dem Know-how, differenziert und kritisch die jeweils verwendeten Daten und Methoden zu hinterfragen, sind auf dem Gebiet der Kernfusionsforschung sehr schwer zu finden. Daher wurde hier methodisch so vorgegangen, dass ein möglichst breites Spektrum von Befürwortern und Kritikern interviewt wurde, damit jeweils die zentralen Argumente mit einbezogen werden konnten. Zusätzlich wurde auch die parlamentarische Anhörung „Kernfusion“, die am 28. März 2001 stattfand, intensiv ausgewertet.

Da im Zusammenhang mit ITER aktueller Entscheidungsbedarf besteht, wird im Folgenden nur die Fusion mit Magnetischem Einschluss eingehend thematisiert. Dieses pragmatische Vorgehen soll jedoch keine Wertung hinsichtlich der Realisierungschancen alternativer Konzepte, z. B. der Trägheitsfusion, implizieren. Detailliertere Informationen zur Trägheitsfusion findet man im Gutachten „Kernfusion“ der Basler & Hofmann AG, Zürich (Basler & Hofmann 2001), das im Auftrag des Bundestages für das TAB erstellt wurde.

Der vorliegende Bericht stützt sich in großen Teilen auf dieses Gutachten. Den Gutachtern Frau Dr. A. Eckhardt und Herrn Dipl.-Ing. P. Meyer sei an dieser Stelle nochmals ausdrücklich für ihre Unterstützung gedankt.

## II. Was ist Kernfusion?

Kernfusion ist der Prozess, durch den in Sternen wie unserer Sonne Energie freigesetzt wird. Nach einer grundlegenden Erkenntnis der Kernphysik kann man sowohl durch die Spaltung (Fission) eines schweren Atomkernes, wie z. B. Uran, als auch durch die Verschmelzung (Fusion) zweier leichter Kerne, z. B. Wasserstoff, Energie gewinnen.

Bevor leichte Kerne miteinander verschmelzen, müssen allerdings die abstoßenden Kräfte zwischen den Kernen überwunden werden. Dies gelingt nur bei extrem hohen Temperaturen im Bereich von einigen 100 Mio. Grad Celsius. Unter solchen Bedingungen entsteht ein so genanntes Plasma, d. h. Atomkerne und Elektronen bewegen sich frei voneinander. Der Plasmazustand wird auch als vierter Aggregatzustand der Materie (neben fest, flüssig, gasförmig) bezeichnet.

Um eine für die technische Energieerzeugung genügende Zahl von Fusionsreaktionen zu erhalten, muss das Plasma über einen hinreichend langen Zeitraum bei einer ausreichenden Dichte und Temperatur eingeschlossen werden. Das Tripelprodukt aus Dichte, Einschlusszeit und Temperatur ist eine wichtige Kennzahl für die Energieproduktion durch Fusion in einem Plasma. Diesen Einschluss zu bewerkstelligen, ist nicht einfach, da Strukturmaterialien, wenn sie dem Plasma ungeschützt ausgesetzt sind, schnell zerstört werden. Hierfür stehen zwei Konzepte zur Verfügung.

Trägheitseinschluss: Ein etwa stecknadelkopfgroßes Brennstoffkügelchen wird z. B. durch einen starken Laserpuls sehr schnell aufgeheizt und verdampft. Die Massenträgheit verhindert, dass die Atome sofort auseinander fliegen. So können im Inneren des Pellets für einen winzigen Moment Fusionsbedingungen herrschen, bevor es auseinander fliegt. In anderen Worten: es wird eine Mikro-Wasserstoffbombe gezündet.

Magnetischer Einschluss: Die elektrisch geladenen Teilchen des Plasmas werden durch die Einwirkung starker magnetischer Felder bei geringer Dichte, aber über Zeiträume von einigen Sekunden oder länger zusammengehalten. Die Magnetfelder werden mittels einer Anordnung von stromdurchflossenen Spulen erzeugt.

Als Brennstoffe für Fusionskraftwerke kommen vor allem die beiden schweren Wasserstoffisotope Deuterium ($^2$H oder D) und Tritium ($^3$H oder T), sowie Helium, Bor und Protonen in verschiedenen Kombinationen infrage (Liebert 1997). Am einfachsten sind die Reaktionsbedingungen für die Fusion von Deuterium und Tritium zu erreichen. Dabei entstehen ein Helium-Kern und ein energiereiches Neutron.[2] Deuterium und Tritium können aus Wasser bzw. aus Lithium gewonnen werden und sind weltweit in großen Mengen verfügbar.

Eine weitere wichtige Kennzahl für die Operation von Fusionsreaktoren ist der Verstärkungsfaktor Q, der das Verhältnis von Fusionsleistung zu zugeführter Heizleistung angibt. Der Fall Q=1, wenn die Fusionsleistung gerade der zugeführten Leistung gleich ist, heißt „Break-Even“. Da die Erzeugung und der Einschluss des Plasmas eine erhebliche Energieinvestition erfordern und die Umwandlung der frei werdenden Wärme in elektrischen Strom mit Verlusten behaftet ist, muss ein Reaktor, der Energie erzeugen soll, bei höherem Q-Wert arbeiten.

Zukünftige Fusionskraftwerke sehen im Kern der Anlage das Plasmagefäß vor, in dem der Fusionsprozess abläuft. Durch den magnetischen oder Trägheitseinschluss wird verhindert, dass das Plasma mit der inneren Wand des Gefäßes, der ersten Wand, in Berührung kommt. Bei Anlagen zur Fusion von Tritium und Deuterium ist das Plasmagefäß von einem Brutmantel umgeben, in dem aus Lithium der Brennstoff Tritium gewonnen wird. Die Produktion erfolgt mithilfe der beim Fusionsprozess frei gesetzten Neutronen. Der Brutmantel nimmt darüber hinaus die bei der Kernfusion erzeugte Energie auf, die typischerweise über Kühlmittel, Wärmetauscher und Generatoren in elektrische Energie umgewandelt wird.

### 1. Geschichtlicher Abriss

E. Rutherford gelang es 1934 als Erstem im Labor Wasserstoffkerne zu Heliumkernen zu verschmelzen. Einen ersten Aufschwung erlebte die Fusionsforschung, als ihr militärisches Potenzial erkannt wurde. 1952 erfolgte die Detonation der ersten Wasserstoffbombe auf dem Eniwetok-Atoll im Pazifik.

Ab 1951 wurde auch der nichtmilitärischen Anwendung der Kernfusion, besonders der Möglichkeit der Strom-

---

[2] $D + T \rightarrow 4\ He\ (3\ 517\ MeV) + n\ (14\ 069\ MeV)$.

erzeugung, größere Aufmerksamkeit gewidmet. Zu diesem Zeitpunkt „schätzte man, dass etwa eine Mio. US-$ über einen Zeitraum von drei bis vier Jahren genügen würden um herauszufinden, ob ein Hochtemperaturplasma von einem magnetischen Feld zusammengehalten werden könnte“ (OTA 1987, Übersetzung durch die Autoren). Diese Einschätzung erwies sich jedoch als bei weitem zu optimistisch.

Die militärische Geheimhaltung wurde für die Fusionsforschung mit Magnetischem Einschluss im Jahr 1958 aufgehoben. Dies öffnete die Tür für eine intensivere internationale Kooperation. Im Zuge der „Atoms for Peace“-Konferenz und der anschließenden Phase der Euphorie wurden die Schwierigkeiten bei der Realisierung der Kernfusion jedoch drastisch unterschätzt: „Ein Report schlussfolgerte 1958: Mit Erfindungsgeist, harter Arbeit und einer Prise Glück scheint es sogar vernünftig zu sein zu hoffen, dass eine komplette Energie produzierende thermonukleare Anlage in ein bis zwei Jahrzehnten gebaut werden kann“ (zitiert nach OTA 1987, Übersetzung durch die Autoren).

Einer Gruppe um die Physiker A. Sacharov und I. E. Tamm gelang es 1968 mit einer toroidalen Spulenanordnung, die sie TOKAMAK nannten, die damaligen Bestwerte des Tripelproduktes um das Hundertfache zu übertreffen. Der TOKAMAK entwickelte sich daraufhin zum international führenden Designkonzept für Fusionsreaktoren. Zu dieser Zeit wurde die Demonstration der technischen Machbarkeit der Energieerzeugung durch Fusion in etwa zehn Jahren erwartet (Rowberg 2000). Um dieses Ziel zu erreichen, wurden immer größere Experimentieranlagen benötigt. Eine Reihe alternativer Einschlusskonzepte wurden parallel verfolgt. Dadurch und stimuliert durch die Ölkrise wurde das Forschungsbudget für die Fusion mit Magneteinschluss wesentlich ausgeweitet, z. B. in den USA von ca. 140 Mio. US-$ 1973 auf ca. 810 Mio. US-$ 1977[3] (Rowberg 2000).

In den folgenden Jahren wurden erhebliche Fortschritte auf der Ebene der Grundlagenforschung vor allem beim Verständnis des Verhaltens heißer Plasmen (Transportphänomene, Turbulenz etc.) und bei der Entwicklung von Technologien zur Erzeugung und zum Einschluss heißer Plasmen (z. B. verschiedene Magnetfeldkonfigurationen, Methoden zur Plasmaheizung und Diagnostik) erzielt.

Der Realisierungshorizont für die technische Energieerzeugung musste jedoch weiter verschoben werden. In 1990 setzte das US Department of Energy das Jahr 2025 als Ziel für die kommerzielle Stromerzeugung. Nach fünf Jahren musste dieser Zeitplan jedoch aufgegeben werden (Rowberg 2000).

In der Bundesrepublik Deutschland setzte die Fusionsforschung unmittelbar nach dem Zweiten Weltkrieg am Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen ein, wo sich die wissenschaftlichen und institutionellen Vorläufer des 1960 gegründeten Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik, IPP, in Garching bildeten.

3 In konstanten US-$ des Jahres 2000.

## 2. Stand der Forschung

Von den beiden Einschlusskonzepten Magnetischer Einschluss und Trägheitseinschluss wird im Weiteren nur noch der Magnetische Einschluss im Detail diskutiert. Der Grund hierfür ist zum einen, dass im Zusammenhang mit dem internationalen Großprojekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), das gegenwärtig in der Planung ist, konkreter politischer Entscheidungsbedarf besteht. Zum anderen ist der Magnetische Einschluss insgesamt weiter fortgeschritten als der Trägheitseinschluss, auch weil der Einsatz an Forschungsmitteln in Deutschland und der EU für das Konzept des Magnetischen Einschlusses bis heute immer wesentlich höher gewesen ist. Eine Bewertung, ob sich der Trägheitseinschluss oder der Magnetische Einschluss eher für die großskalige Stromerzeugung eignet oder welches der beiden Konzepte die besseren Realisierungschancen hat, soll damit nicht impliziert werden.

In den letzten Jahrzehnten konnte in einer Reihe von Großexperimenten das Konzept des Magnetischen Einschlusses wesentlich weiterentwickelt werden. Das Tripelprodukt konnte in den letzten 40 Jahren um den Faktor 10 000 gesteigert werden. Zur Erreichung von Reaktorbedingungen fehlt noch etwa ein Faktor 6 (Pellat 1999). Die derzeit größte und leistungsfähigste Anlage, das EU-Projekt JET (Joint European Torus), steht in Culham, England. Die Reaktionskammer hat einen Durchmesser von 3 m bei einem Magnetfeld von bis zu 4 Tesla (Paméla/Solano 2001). Mit JET konnte 1997 eine Fusionsleistung von 16 MW in einem Puls von etwa einer Sekunde Dauer bzw. ca. 5 MW für 5 s Dauer erzeugt werden.

Es ist Konsens in der Fusionsgemeinde, dass das Reaktororientierte Forschungsprogramm fortgeführt werden sollte, um über zwei Zwischenschritte, ITER und DEMO (Demonstration Fusion Powerplant), den Bau eines ersten kommerziellen Fusionsreaktors um das Jahr 2050 vorzubereiten.[4]

Ziel von ITER ist es, die physikalische Machbarkeit eines energieerzeugenden Plasmas zu beweisen. Der TOKAMAK ITER wird mit einem Radius von ca. 6 m etwa doppelt so groß wie JET. Ein „brennendes“ Plasma mit einem Q-Faktor von etwa 10 soll über eine Zeit von etwa 500 s eingeschlossen werden. Als technologische Ziele im Hinblick auf ein mögliches Fusionskraftwerk soll die Kompatibilität wesentlicher Komponenten mit dem thermonuklearen Plasmabetrieb gezeigt werden. Daneben ist der Test von Konzepten für Tritium-Brutmodule geplant.

Bei ITER handelt es sich um ein partnerschaftliches Unternehmen der Europäischen Union, Japans und Russlands. Weitere Länder partizipieren über einen dieser Partner, Kanada beispielsweise über die Europäische Union. Die USA, die ursprünglich ebenfalls zu den Partnern zählten,

4 In jüngster Zeit wird die Möglichkeit einer Beschleunigung dieses Zeitplans diskutiert, indem in der ersten Phase (ITER) zusätzliche Mittel bereitgestellt werden, um die Entwicklung soweit voranzutreiben, dass in der zweiten Phase eine Anlagengeneration übersprungen werden kann und DEMO und der kommerzielle Prototyp-Reaktor zusammengefasst werden können (King et al. 2001).

zogen sich 1999 – offenbar aus budgetären Überlegungen und durch Verzögerungen bei der Projektrealisierung veranlasst – aus dem Projekt zurück. Deutschland setzte sich zunächst für Greifswald als Standort für die ITER-Anlage ein. Da das Projekt für das Standortland jedoch mit Kosten in Milliardenhöhe verbunden ist, wurde später auf eine Standortbewerbung verzichtet. Heute gelten Japan, Kanada und Frankreich als aussichtsreiche Kandidaten für den Standort der Versuchsanlage.

Parallel zu ITER ist der Bau einer speziellen hochintensiven Fusionsneutronenquelle erforderlich, um niedrig aktivierbare Materialien zu entwickeln und zu testen. Das Konzept einer solchen Anlage, der International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF, wurde in internationaler Kooperation ausgearbeitet und bei der International Energy Agency, IEA, vorgelegt (Bradshaw 2001).

Ebenfalls parallel zu ITER soll mit der Anlage Wendelstein 7-X das Konzept des Stellarators weiter entwickelt werden. Dieses Konzept verspricht Vorteile hinsichtlich eines Reaktor-Dauerbetriebes.

DEMO soll die technische Machbarkeit eines Fusionskraftwerks beweisen und erstmals elektrischen Strom im Dauerbetrieb erzeugen. Anders als bei ITER sind damit auch die zur Energieumwandlung benötigten Ausrüstungen Teil des Projekts. Funktion der Anlage ist es zudem, Materialien und Komponenten für mögliche kommerzielle Fusionskraftwerke in ihrem Zusammenspiel in Langzeitversuchen testen zu können.

Bei günstigem Verlauf der Großexperimente ITER und DEMO könnte gegen 2045 mit dem Bau erster kommerzieller Fusionskraftwerke begonnen werden. Der Aufbau der erforderlichen industriellen Infrastruktur sollte dann bereits durch DEMO stimuliert worden sein (Bradshaw 2001; Najmabadi et al. 1997).

## 3. Wissenschaftlich-technische Herausforderungen

Vor dem Ziel eines elektrizitätserzeugenden Fusionsreaktors stehen eine ganze Reihe höchst anspruchsvoller wissenschaftlich-technischer Herausforderungen (Bradshaw 2001; Liebert 2001; Samm 2001; Tran 18. April 2001, Expertengespräch). Besonders in den folgenden Bereichen gibt es noch einen hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

### 3.1 Physik des brennenden Plasmas

Das unter Reaktorbedingungen eingeschlossene Plasma zeichnet sich durch eine turbulente und bisweilen chaotische Dynamik aus. Die Kontrolle dieser Dynamik ist entscheidend für das Funktionieren eines Reaktors, da es ansonsten zu häufigen Instabilitäten und Plasmaabrissen (Disruptionen) kommen kann. Ein Plasmaabriss führt zu extrem hohen und auf Dauer zerstörerischen Belastungen für die „erste Wand“.

Die in der Fusionsreaktion erzeugten $\alpha$-Teilchen tragen zu einer lokalen Aufheizung des Plasmas bei und können unter Umständen Instabilitäten auslösen. Daher ist der Einschluss eines brennenden Plasmas eine wesentlich größere Herausforderung als der eines nicht-brennenden. Die Aufklärung der Rolle der in der Fusionsreaktion entstehenden $\alpha$-Teilchen, sowie die Diagnose, das Verständnis und die Kontrolle dieser Instabilitäten ist eines der wesentlichen Ziele des ITER-Projekts. Daneben ist eine Fortentwicklung der Technologien zur Aufheizung des Plasmas und zur Brennstoffzufuhr notwendig.

### 3.2 Kernfusions-Technologie

Der Reaktorbetrieb verlangt, dass das Plasma z. B. durch Kontakt mit der ersten Wand oder Akkumulation von Produkten der Fusionsreaktion („Asche“) nicht wesentlich verunreinigt wird. Die Entfernung von Plasmaverunreinigungen durch geeignete Maßnahmen ist daher von hoher Bedeutung für die Funktionsfähigkeit des Reaktors. Hierfür verwendete Bauteile, so genannte Divertoren, sind höchsten Belastungen ausgesetzt. Ihre Lebensdauer muss maximiert werden, da das ständige Auswechseln dieser Komponenten zu unakzeptablen Stillstandszeiten führen würde. Zu diesem Zweck ist auch die Fortentwicklung von Fernsteuerungseinrichtungen für Komponentenaustausch und Wartung im „heißen“ Bereich notwendig.

Wichtig für den Reaktorbetrieb ist auch der Brutmantel, eine das Plasmagefäß umgebende Struktur, die mehrere

Tabelle 1

**Ziele von ITER und DEMO im Vergleich mit dem Stand der Technik in JET**

| | Jahr | Fusionsleistung (MW) | Pulsdauer (s) | Anteil der $\alpha$-Selbstheizung* | Q-Faktor |
|---|---|---|---|---|---|
| JET | 1997 | 16 | ~1 | 0,11 | 0,62 |
| ITER | ~2020 | >400 | ~500 | >0,67 | >10 |
| DEMO | ~2030–2040 | ~2 000 | Quasi kontinuierlich | >0,85–0,9 | >30 |

* Da die $\alpha$-Teilchen etwa 1/5 der frei werdenden Energie tragen, gilt: Anteil der $\alpha$-Heizung=Q/(Q+5).

Quelle: Nach Paméla/Solano 2001

Aufgaben gleichzeitig erfüllen muss: erstens die Fusionsneutronen abbremsen, zweitens die entstehende Wärme zum Primärkühlkreislauf leiten und drittens mithilfe der beim Fusionsprozess frei werdenden Neutronen aus Lithium den Fusionsbrennstoff Tritium gewinnen. Je nach dem Fortgang des ITER-Testprogramms, kann der Bau einer separaten Brutmantel-Testanlage notwendig werden (OTA 1995).

### 3.3 Optimierung des magnetischen Einschlusses

Beim derzeit favorisierten Anlagenkonzept des TOKAMAK ist ein im Plasma selbst fließender elektrischer Strom notwendig, um den Einschluss aufrechtzuerhalten. Wird dieser Strom konventionell, d. h. induktiv, erzeugt, begrenzt er die Entladungsdauer. Solche Anlagen können nur gepulst betrieben werden. Daher werden alternative Wege untersucht, um den Plasmastrom hervorzurufen und damit einen kontinuierlichen statt eines gepulsten Betriebs zu ermöglichen. Mit ITER soll eine solche Lösung realisiert werden (Vetter 2001). Der effiziente kontinuierliche Plasmastrombetrieb stellt gegenwärtig eine der zentralen Herausforderungen bei der Nutzbarmachung des Tokamak zur Energieproduktion dar (Samm 2001).

Ein anderer Ansatz wird mit dem Stellarator verfolgt. Dieses zum TOKAMAK alternative Anlagenkonzept gewährleistet den Plasmaeinschluss durch eine komplexe Spulengeometrie, sodass kein Plasmastrom erforderlich ist. Der Stellarator eignet sich also intrinsisch besser zu einem nicht gepulsten Dauerbetrieb. In der Versuchsanlage „Wendelstein“ in Greifswald soll dieses Konzept weiterentwickelt und auf seine Reaktortauglichkeit hin untersucht werden.

Daneben wird die Entwicklung supraleitender Magnetfeldspulen für den Reaktoreinsatz vorangetrieben, die den Energiebedarf für die Spulen erheblich reduzieren würden. Derzeit übersteigt der Materialbedarf für die Spulen eines großen Reaktors noch die Produktionskapazität der einzelnen Länder, sodass eine kooperative Lösung angestrebt werden muss (OTA 1995).

### 3.4 Niedrig aktivierbare reaktortaugliche Materialien

Für das Funktionieren von Fusionsreaktoren spielt die Entwicklung von Materialien insbesondere für die erste Wand, den Brutmantel und im Inneren der Anlage befindliche Strukturen eine besondere Rolle. An diese Materialien muss eine Reihe von extremen und zum Teil miteinander in Konflikt stehenden Anforderungen gestellt werden. Sie müssen äußerst hohe Temperaturen und periodische Wärmebelastungen aushalten, neutronenbeständig sein, der Erosion durch das chemisch aggressive Plasma widerstehen und unter intensiver Neutronenbestrahlung möglichst keine Radioaktivität entwickeln. Diese Anforderungen sind – besonders in Kombination miteinander – noch unerreicht.

Von der Entwicklung solcher niedrig aktivierbarer Materialien hängt es unter anderem ab, in welchem Umfang radioaktive Abfälle entstehen, die in ein Endlager verbracht werden müssten.

### 4. Technische Realisierbarkeit von Fusionskraftwerken

Dass die oben skizzierten Herausforderungen bewältigt werden können und die technische Machbarkeit der Stromerzeugung durch Kernfusion gezeigt werden kann, ist die feste Überzeugung der Community der Fusionsforschenden. Der hierfür notwendige Forschungs- und Entwicklungsprozess wird sich über mehrere Jahrzehnte erstrecken und den Einsatz von Fördermitteln im großen Maßstab erfordern. Der Realisierungshorizont 2050 setzt damit nicht nur eine günstige wissenschaftlich-technische Entwicklung, sondern auch geeignete wirtschaftliche und politische Rahmenbedingungen voraus.

Alle derartigen Prognosen beruhen auf einer Extrapolation der bisher gemachten Erfahrungen in die Zukunft. Gerade in der Forschung sind aber Prognosen über einen solch langen Zeitraum aufgrund des unvermeidlichen Überraschungsmomentes kaum zuverlässig möglich. So wurden in der fast 50-jährigen Geschichte der Kernfusionsforschung die Schwierigkeiten für die Entwicklung eines Fusionskraftwerkes unterschätzt, sodass der Realisierungshorizont weiter in die Zukunft gerückt werden musste.

## III. Was kostet die Fusionsforschung?

In den letzten 30 Jahren wurden erhebliche öffentliche Mittel in die Förderung der Plasmaforschung investiert. Bis zur möglichen Realisierung der Stromerzeugung durch Kernfusion müssten nach heutiger Schätzung Forschung und Entwicklung noch einmal über 50 Jahre in einem Umfang von insgesamt etwa 60 bis 80 Mrd. Euro – davon innerhalb der EU 20 bis 30 Mrd. Euro – gefördert werden (Bradshaw 2001; Liebert 1997).

Für die Bewertung der Frage, welcher Lösungsbeitrag zur langfristigen Sicherung der Energieversorgung damit generiert werden kann, ist ein Blick auf die Förderung der Energieforschung in ihrer Gesamtheit erforderlich. Wenn die Fusionsforschungsmittel in einem Konkurrenzverhältnis zur Förderung der Entwicklung neuer Technologien zur Energieeinsparung und zur Nutzung regenerativer Energien stehen sollten, wird dies anders zu beurteilen sein, als wenn es sich um zusätzliche Mittel handelt.

### 1. Forschungsförderung weltweit

Die Ausgaben aller OECD-Länder für Fusionsforschung lagen im Zeitraum von 1974 bis 1998 bei ca. 30 Mrd. Euro (Bradshaw 2001). Die jährlich in die zivile Kernfusionsforschung investierten Gelder betragen derzeit etwa 1,4 Mrd. Euro (Edwards 2000). Wichtige Forschungsprogramme bestehen vor allem in den USA, Japan und Europa. In den USA hat das Department of Energy, DOE, für das Jahr 2001 248,5 Mio. US-$ für die wissenschaftliche Erforschung der Kernfusion beantragt. Davon sind ungefähr 17,5 Mio. US-$ für wissenschaftliche Forschung zur Trägheitsfusion mit Schwerionenantrieb vorgesehen, zusätzlich werden erhebliche Mittel aus dem Verteidigungsetat hierfür eingesetzt.

## 1.1 Europäische Union

In der Europäischen Union wurden bis Ende der 90er-Jahre nahezu 10 Mrd. Euro für die Fusionsforschung aufgewendet (Liebert 1999). Im Durchschnitt der Jahre 1995 bis 1999 lagen die Aufwendungen bei 470 Mio. Euro jährlich (Randl 2001). Die Kosten werden zu etwa 40 % vom europäischen Rahmenprogramm – in diesem Falle von EURATOM – und zu etwa 60 % von der direkten nationalen Förderung getragen (Samm 2001). Im 5. Rahmenprogramm sind für den Zeitraum von 1999 bis 2002 788 Mio. Euro für die Fusionsforschung vorgesehen, das entspricht ca. 200 Mio. Euro pro Jahr. Für das 6. Rahmenprogramm für die Jahre 2002 bis 2006 hat die Europäische Kommission 700 Mio. Euro veranschlagt (Europäische Kommission 2001).[5]

Zum Vergleich: Die Europäische Kommission unterstützt im Haushaltsjahr 2001/2002 die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten europäischer Unternehmen im Bereich nicht nuklearer Energie mit rund 560 Mio. Euro (IWR 2001).

Rund die Hälfte der von der Europäischen Union vergebenen Mittel fließt den assoziierten Partnern zu, in Deutschland dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und den Forschungszentren Jülich und Karlsruhe. Die übrigen Mittel kommen unter anderem den Gemeinschaftsprojekten JET und ITER zugute (Randl 2001).

## 1.2 Deutschland

Die deutschen Beiträge zu den europäischen Institutionen und damit auch zu EURATOM liegen derzeit, dem deutschen Anteil am Bruttosozialprodukt der EU entsprechend, bei 26 % oder 48 Mio. Euro. Deutschland bezieht jedoch mehr als 40 % der von Euratom an seine assoziierten Partner für Fusionsforschung vergebenen Mittel, im Jahr 1999 ebenfalls etwa 48 Mio. Euro (Bradshaw 2001; Randl 2001).

Die Forschungsinvestitionen in die Kernfusion in Deutschland betragen gegenwärtig insgesamt etwa 160 Mio. Euro (Samm 2001; Randl 2001), die aus Mitteln des Bundes, der Länder und von EURATOM stammen.

Zum Vergleich: Die FuE-Aufwendungen des Bundes für Erneuerbare Energien und rationelle Energieverwendung betrugen im Jahr 2000 153 Mio. Euro, für 2001 betrug der Etatansatz hierfür 192 Mio. Euro (BMBF 2002, S. 250 f.).

Tabelle 3

**Ausgaben des Bundes für die Fusionsforschung**

| Jahr | Bundesmittel gerundet in Mio. Euro |
|---|---|
| 1995 | 105 |
| 1996 | 99 |
| 1997 | 108 |
| 1998 | 122 |
| 1999 | 132 |
| 2000 | 135 |
| 2001 (geplant) | 116 |
| 2002 (geplant) | 113 |

Weitere Forschungsgelder stellen die Bundesländer bereit. So wird beispielsweise das Max-Planck-Institut für Plasmaphysik von den Ländern Bayern, Mecklenburg-Vorpommern und Berlin mitfinanziert.
Quelle: BMBF 2002

[5] Das Europäische Parlament hat 800 Mio. Euro vorgeschlagen. Ein überarbeiteter Kommissionsvorschlag sieht 750 Mio. Euro für 2003 bis 2006 vor, davon 200 Mio. für ITER (Europäische Kommission 2002). Da der Entscheidungsprozess hierzu in vollem Gange ist, können die Budgetansätze sich noch ändern.

Tabelle 2

**Verteilung der Forschungsförderung auf magnetischen Einschluss und Trägheitseinschluss in der Europäischen Union und den USA, geschätzte und gerundete Werte**

| Region | Einschlusskonzept | Forschungsförderung (Mio. Euro im Jahr 2001) |
|---|---|---|
| Europäische Union | magnetischer Einschluss | 500 |
| | Trägheitseinschluss | Zivil 5 |
| | | militärisch k. A. |
| USA | magnetischer Einschluss | 250 |
| | Trägheitseinschluss | Zivil 20 |
| | | militärisch 500 |

Quelle: Basler & Hofmann 2001, S. 64

Künftige Aufwendungen: Falls ITER realisiert werden sollte, wird die Kostenaufteilung noch Gegenstand von Verhandlungen sein. Bei einem Standort außerhalb Europas, etwa in Japan, wird das europäische Fusionsbudget voraussichtlich konstant bleiben können, da das Sitzland einen wesentlichen Anteil der Errichtungskosten übernimmt. Wird ein Standort in Europa gewählt, würde diese Entscheidung erhebliche Einsparungen an anderen Stellen im europäischen Fusionsprogramm und wahrscheinlich auch eine Erhöhung des Gesamtbudgets notwendig machen. Die erforderliche Aufstockung des Etats dürfte allerdings nach Prognosen aus der Community der Fusionsforschenden gering ausfallen (Bradshaw 2001).

### 2. Investitionen in Forschungsanlagen

Das ITER-Projekt wurde in den Jahren 1998 bis 2000 von zunächst 7 Mrd. Euro Baukosten auf 3,5 Mrd. Euro redimensioniert (Edwards 2000), die sich voraussichtlich über zehn Jahre verteilen werden. Begleitende Kosten für ITER-spezifische Forschungs- und Entwicklungsaufgaben werden auf 0,7 Mrd. Euro, die Betriebskosten auf 0,24 Mrd. Euro jährlich geschätzt. Deutschland ist an den für ITER erforderlichen Aufwendungen lediglich indirekt durch seinen Beitrag zum Haushalt der EU beteiligt (Bradshaw 2001). Bisher wurden für ITER etwa 1 Mrd. Euro – hauptsächlich für den Bau von Prototyp-Komponenten – aufgewendet (Bradshaw et al. 15. Juni 2001, Expertengespräch).

Für die Stellarator-Versuchsanlage Wendelstein 7-X in Greifswald sind Investitionen in Höhe von ca. 620 Mio. Euro veranschlagt, die zu 27 % von der Europäischen Union, zu 57 % vom Bund und zu 16 % von Bundesländern getragen werden (Randl 2001).

Die Investitionen für die als Voraussetzung für DEMO erforderliche Neutronenquelle IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) werden mit ca. 600 Mio. Euro veranschlagt. Zusätzlich werden, ebenso wie bei ITER und DEMO, Betriebskosten anfallen (Bradshaw 2001).

Die Investitionen für DEMO dürften bei 1 000 MW elektrischer Leistung bei ca. 8 Mrd. Euro liegen. Die Betriebskosten von DEMO können eventuell zumindest teilweise durch den erzeugten elektrischen Strom gedeckt werden. Entscheidend für den Kostenrahmen von DEMO wird unter anderem sein, ob das Projekt international koordiniert oder im Wettbewerb durchgeführt wird. Zumindest im Anschluss an DEMO scheint es möglich, dass die bisherigen Partnerländer getrennte Wege gehen werden, um ihrer nationalen Industrie Standortvorteile zu sichern (Bradshaw 2001).

## IV. Brauchen wir Kernfusion?

Die Frage nach der zukünftigen Rolle der Kernfusion in einer nachhaltigen Energieversorgung lässt sich konkret am ehesten mit Blick auf bestimmte energiepolitische Ziele diskutieren, zum Beispiel:

– Brauchen wir Kernfusion zur Deckung des global zunehmenden Energiebedarfes?

– Brauchen wir Kernfusion als Ergänzung, um die nachhaltige Nutzung[6] verfügbarer fossiler Rohstoffressourcen zu ermöglichen?

– Brauchen wir Kernfusion im Energiemix zur Reduzierung von $CO_2$-Emissionen bei der Bereitstellung von Elektrizität?

Ausgangspunkt für die folgenden Betrachtungen ist die weithin vertretene, auf die technische Machbarkeit bezogene – noch unbewiesene – These: „Ab Mitte des 21. Jahrhunderts wären Fusionskraftwerke kommerziell verfügbar“. Dabei wird auf mögliche Entwicklungen des globalen und nationalen Energieverbrauchs und daran beteiligter Energieträger anhand verfügbarer Energieszenarien sowie auf die Thematik Kernfusion und Klimaschutz eingegangen.

### 1. Längerfristige Entwicklung der Energiesituation

Mit Bezug auf o. g. These ist für eine Einordnung des „Bedarfes an Kernfusion“ die Energiesituation etwa ab dem Jahre 2050 interessant. Damit wird eine Abschätzung der Energiesituation benötigt, die die Entwicklung des globalen Energiebedarfs, etablierter und neuer Technologien, der energiepolitischen Rahmenbedingungen sowie neuer Erkenntnisse hinsichtlich der Endlichkeit fossiler Energierohstoffressourcen und der Belastbarkeit der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 50 Jahren einschließt. Eine solche Beurteilung ist aus heutiger Sicht nur relativ vage und nur unter Setzung von diversen Annahmen durchführbar. In der Literatur verfügbare Energieszenarien stellen für diese Betrachtung einen ersten Anhaltspunkt dar.

### 1.1 Langfristszenarien zur Entwicklung des Energiebedarfs und der eingesetzten Energieträger

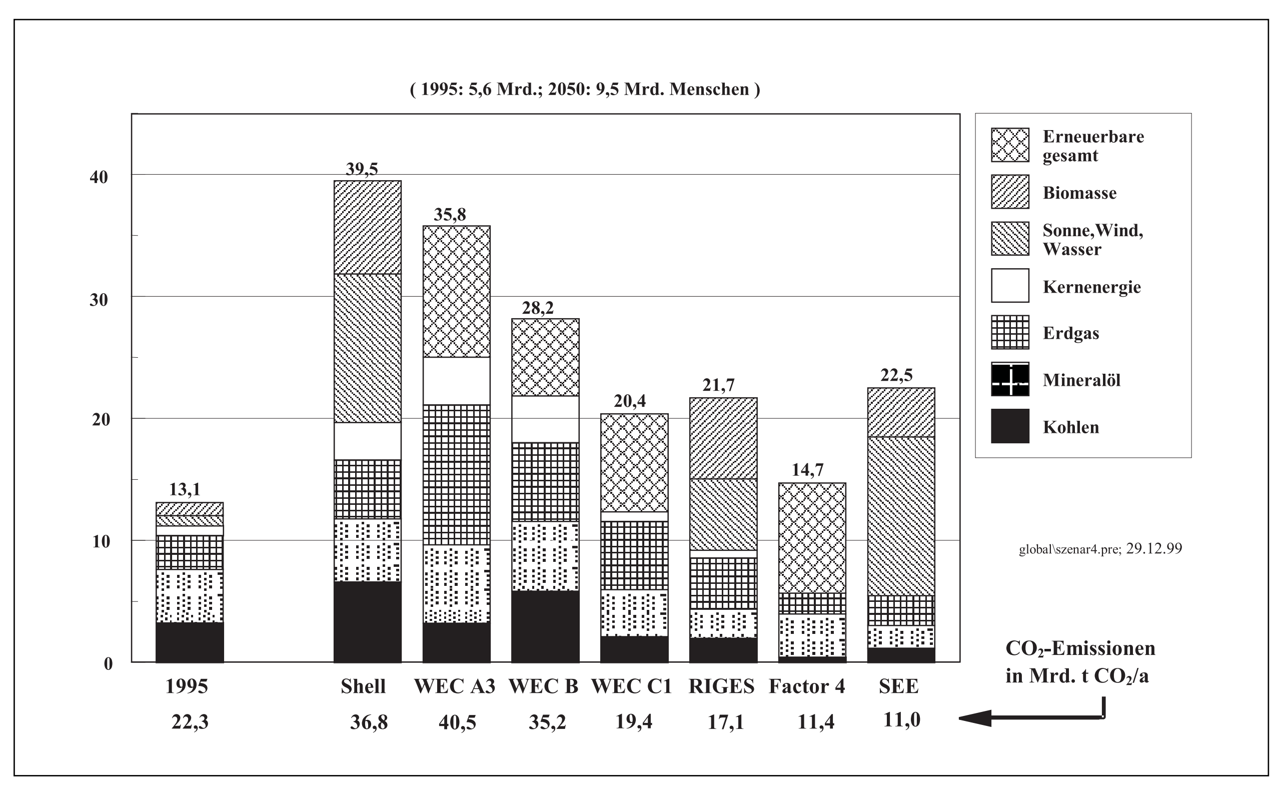
#### 1.1.1 Energiebedarf

Szenarien zum Weltenergieverbrauch, teilweise differenziert nach Energieträgern und nach Regionen, werden u. a. von der Internationalen Energie-Agentur (IEA), dem Weltenergierat (WEC) oder auch von der Europäischen Kommission herausgegeben. Beispiele für Energieszenarien (Abb. 1) sind das Shell-Szenario (Abb. 2) (Shell 1995), welches eine denkbare globale Entwicklung bis 2060 beschreibt, und die Szenarien zur langfristigen

[6] Der Begriff der Nachhaltigkeit ist hier gemeint im Sinne der Definition, die in den Enquete-Kommissionen „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages und „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages verwendet wird. Zur Nutzung fossiler Energieträger heißt es dort (Enquete-Kommission 1998, S. 25 bis 28 ff.; Enquete-Kommission 2001, S. 27): „Nicht erneuerbare Ressourcen sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger Ersatz in Form erneuerbarer Ressourcen oder höherer Produktivität der erneuerbaren sowie der nicht erneuerbaren Ressourcen geschaffen wird“. Vergleich auch (Jörissen et al. 1999, S. 69 f.): „Die Reichweite der nachgewiesenen nicht erneuerbaren Ressourcen ist über die Zeit zu erhalten.“

Abbildung 1

**Aktuelle Szenarien des Weltenergieverbrauchs für das Jahr 2050***




* Bevölkerung 2050: 9,5 Mrd.; Shell = Szenario „Nachhaltige Entwicklung“ (Shell 1995); WEC = Diverse Szenarien der Weltenergiekonferenzen 1995 und 1998 (WEC 1995 u. 1998); RIGES = „Renewable Intensive Global Energy Scenario“ (Johansson 1993); Factor 4 = Szenario aus (Lovins/Hennicke 1999); SEE = Szenario „Solar Energy Economy“ (Nitsch 1999); 1 Mrd. t SKE/a = 29,3 EJ/a.

Quelle: Nitsch/Rösch 2001

Entwicklung des Energiebedarfes von (WEC/IIASA 1998), mit drei verschiedenen Szenarien bis 2050 (Prognosestützjahr 2020) und Entwicklungstendenzen bis 2100.

Beispiele für Energieszenarien, die explizit auf bestimmte Zielgrößen, wie etwa die signifikante Minderung von Treibhausgasemissionen und/oder den Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie, ausgelegt sind, sind das globale Faktor-Vier-Szenario von (Lovins/Hennicke 1999) und für Deutschland das solare Langfristszenario von (Langniß et al. 1997; Nitsch et al. 2000). Dabei gilt i. a.: je längerfristiger der Prognosehorizont aus heutiger Sicht, desto unschärfer die Interpretation daraus ableitbarer Aussagen. Beispielsweise zeigen die in (Lovins/Hennicke 1999) untersuchten Weltenergieszenarien bis 2030/2050 bei ähnlichen Annahmen über das Wirtschafts- und Bevölkerungswachstum einen um den Faktor sieben unterschiedlichen Energieverbrauch.

Aus der Gegenüberstellung globaler Energieszenarien ist ersichtlich, dass zukünftig weiterhin von einem Mehrbedarf an Energie ausgegangen wird. Der globale Mehrverbrauch an Energie im Jahre 2050 wird im Wesentlichen auf die Angleichung des Pro-Kopf-Verbrauches an Energie zurückgeführt. Der Pro-Kopf-Energieverbrauch in den industrialisierten Ländern beträgt derzeit etwa das Achtfache desjenigen in weniger entwickelten Regionen (Cole 1999). Verschiedene Expertenschätzungen (WEC, IEA, EIA etc.) gehen davon aus, dass der weltweite Bedarf an Primärenergie bis zum Jahr 2050 auf das Zwei- bis Dreifache des Wertes von 1990 zunimmt. Dabei wird der Weltenergieverbrauch zukünftig von den Entwicklungsländern Asiens dominiert werden. Wesentliche Einflussfaktoren sind das Wachstum der Weltbevölkerung von zurzeit 6 Mrd. Menschen auf etwa 10 Mrd. im Jahre 2050 sowie ein erheblicher wirtschaftlicher Aufholbedarf der Schwellen- und Entwicklungsländer.

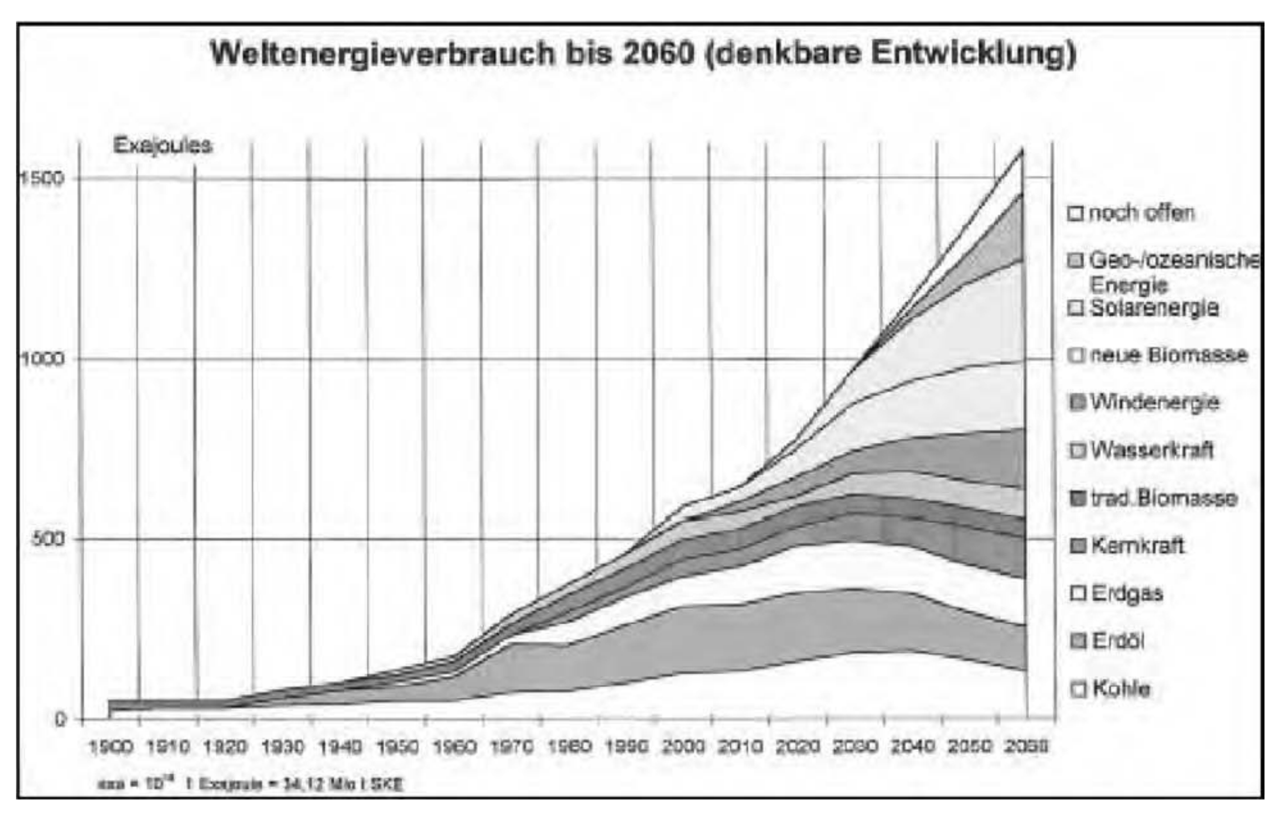
Bei Industrieländern wird zwar von stagnierenden bis eher schrumpfenden Energiemärkten ausgegangen, dennoch bestehen gerade hier signifikante Energie-Einsparpotenziale.[7] Deren Ausschöpfung stehen in den Industrieländern allerdings in allen Verbrauchssektoren eine ganze Palette von Hemmnissen und Marktunvollkommenheiten entgegen.

[7] So zeigen etwa verschiedene Szenarienrechnungen für Deutschland eine Verringerung des gesamten Stromverbrauchs bis zum Jahr 2020 von 10 bis zu 30 % gegenüber einer „Business as usual“-Entwicklung auf (TAB 2000).

Abbildung 2



**Shell-Szenario zur Entwicklung des Weltenergieverbrauchs bis zum Jahre 2060**




Quelle: Shell 1998

Im Jahre 1990 wurden rund 30 % der weltweit verwendeten Primärenergieträger zur Bereitstellung von Elektrizität genutzt. Die Anteile von Elektrizität und Wärme am Energieverbrauch werden sich verändern. Bis zum Jahre 2050 wird prozentual gesehen weltweit mit einem erhöhten Anteil an Elektrizität am Primärenergieverbrauch im Vergleich zur heutigen Situation gerechnet. Bei einer Verdopplung des Gesamtenergieverbrauchs könnte sich der Bedarf an Elektrizität etwa verdreifachen (Hogan/Bertel 1995; Holdren et al. 1995).

### 1.1.2 Energieträger

Aus der Gegenüberstellung globaler Energieszenarien bis 2050 (Abb. 1) wird in Bezug auf die angenommene Energieträgerverteilung ersichtlich, dass

– regenerative Energieträger in allen Szenarien einen beträchtlichen Zuwachs erfahren,

– in Szenarien mit „Business as usual“-Charakter (wie Shell, WEC A3 und B) gleichzeitig mit dem Bedarf an regenerativen auch jener an fossilen Ressourcen und an Kernenergie anwächst (insgesamt steigen dadurch die Treibhausgasemissionen an),

– nur in Szenarien, die einen signifikanten Zuwachs bei regenerativen Energieträgern verbunden mit einer effizienteren Energienutzung unterstellen und damit von einem Rückgang des absoluten Energieverbrauchs in den Industrieländern ausgehen (wie WEC C1, RIGES, Factor 4, SEE), Möglichkeiten zur substanziellen Verringerung des Verbrauchs endlicher Energieressourcen und damit von Treibhausgasemissionen aufgezeigt werden (Nitsch 2001),

– einige Szenarien ein offenes Feld enthalten für neue Formen der Energiegewinnung (z. B. Shell 1995) (Abb. 2) und

– die Option Kernfusion als eigenständige Energiequelle in den aggregierten Darstellungen nicht auftaucht.

Die derzeitige Deckung des Weltenergiebedarfes erfolgt im Wesentlichen durch fossile Energieträger (s. erste Säule in Abb. 1). Der Anteil regenerativer Energieträger daran ist derzeit vergleichsweise gering. Prognosen über den künftigen Anteil nicht erneuerbarer Primärenergieträger an der weltweiten Energieversorgung schwanken zwischen 25 und 75 %[8] (Basler & Hofmann 2001).

[8] Darüber hinaus gibt es auch Energieszenarien, die von der Möglichkeit einer Vollversorgung mit regenerativen Energieträgern in Europa ausgehen (LTI 1998).

Bei der Beurteilung des zukünftigen Einsatzspektrums fossiler Energieträger spielt die nach heutigem Kenntnisstand mögliche Einschätzung über deren statische und dynamische Reichweite und über die Verteilung der Rohstoffressourcen und -reserven eine ausschlaggebende Rolle. Eine Zusammenstellung über hierfür zur Verfügung stehende Daten und daraus ableitbare Aussagen bezüglich erwarteter Reichweiten von Erdöl und Erdgas findet sich u. a. in (TAB 2000). Die Verteilung von Rohstoffen ist global gesehen deutlich unterschiedlich. Auch Deutschland ist in einem hohen Maße auf den Import von fossilen Energierohstoffen angewiesen, wobei angesichts des derzeit bestehenden Energiemixes, der Verteilung der Energieimporte auf mehr als 15 Länder sowie der Eigenförderung derzeit aus nationaler Sicht eine ausreichende Diversifizierung der Energieversorgung besteht. Allerdings wird global gesehen das Ungleichgewicht in der regionalen Verteilung „sensibler“ Energiereserven (Erdöl, Erdgas) auch zukünftig immer weniger mit der regionalen Verteilung des Energieverbrauchs und des Energieverbrauchszuwachses korrespondieren. Damit werden u. a. Importabhängigkeiten deutlich zunehmen.

Im Sinne einer nachhaltigen Energieversorgung spielt die Beurteilung der Potenziale regenerativer Energieträger[9] in Energieszenarien eine entscheidende Rolle. Im Unterschied zu fossilen Energieträgern ist das theoretische Potenzial regenerativer Energieträger hinreichend groß, auch wenn dessen technische Nutzung bisher keinen mit fossilen Energieträgern vergleichbaren Reifegrad erreicht hat. Somit sind konkretisierte Ausbauszenarien für den Einsatz regenerativer Energieträger etwa bis zum Jahre 2010[10] mit einer Reihe von Annahmen im Hinblick auf deren technische und ökonomische Umsetzbarkeit versehen. Darüber hinausgehende szenarische Betrachtungen (Abb. 1) etwa bis 2050 weisen erhebliche Differenzen in Bezug auf Anteile regenerativer Energieträger an der Energieversorgung in Abhängigkeit von zugrunde gelegtem Ausbaugrad und Energieeinsparpotenzial auf. Außerdem weisen die einzelnen regenerativen Energieträger (Wasserkraft, Biomasse, Windenergie etc.) unterschiedliche Ausbaupotenziale auf. Einzelnen Szenarien liegt unter technisch nachvollziehbaren Annahmen bis 2050 eine zu wesentlichen Anteilen auf regenerativen Energieträgern basierende Versorgung mit Elektrizität zugrunde. Die technische Machbarkeit stößt derzeit an ökonomische Grenzen, die u. a. durch die Möglichkeiten zur ausreichenden Speicherung von Elektrizität und die Höhe der hierfür notwendigen ökonomischen Aufwendungen gesetzt werden. Inwieweit diese Grenzen bis 2050 durch neue Entwicklungen verschoben werden, ist offen.

### 1.1.3 Energietechnologien

Eine Differenzierung nach im Jahre 2050 einsetzbaren Technologien wird in den Energieszenarien nicht vorgenommen. Implizit liegen den Energieszenarien dennoch Annahmen hinsichtlich eingesetzter Technologien zugrunde. Tendenziell wird von einer deutlichen Effizienzsteigerung bei Energieumwandlungs- und -speichersystemen sowie im Energiemanagement ausgegangen. Das Tempo technologischer Entwicklungen wird eher zunehmen. Welche Energieumwandlungstechnik allerdings bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts eine dominierende Rolle spielt, beispielsweise Brennstoffzellen, Wasserstofftechnologien oder Kernfusion, kann aus den vorliegenden Energieszenarien nicht abgeleitet werden.

Dabei ist auch die Überlegung mit einzubeziehen, dass der verstärkte Einsatz einzelner Technologien deutliche Verschiebungen der Energieträgernutzung (z. B. Nutzungskonkurrenz bei Erdgas durch Brennstoffzellen und Erdgasfahrzeuge) hervorrufen kann. Wahrscheinlich weisen solche Energieumwandlungstechnologien eine größere (Markt-)Chance auf, die mit verschiedenen Brennstoffen betrieben werden können.

Mit Energiesparmaßnahmen – als Mischung aus technischen und verhaltensbezogenen Maßnahmen – kann der erwartete deutliche Anstieg des Weltenergiebedarfs zwar gebremst werden. Dennoch greifen Energiesparmaßnahmen vor allem in bereits entwickelten Industrieländern, die über entsprechendes Know-how und Kapital verfügen. In Entwicklungsländern werden solche Maßnahmen nur über deutlich längere Zeiträume ein Rolle spielen.

Momentan zeichnet sich keine klare technische Entwicklungslinie ab, welche Energieumwandlungstechnik(en) Mitte des 21. Jahrhunderts eine dominierende Rolle spielen wird (werden). Möglich erscheinen derzeit verschiedene Optionen, wie beispielsweise die der umweltschonenderen Nutzung fossiler Energieträger oder die praxisnah weiterentwickelten Techniken zur Nutzung erneuerbarer Energien. Kernfusion stellt dabei eine unter zahlreichen Optionen für die künftige Energieversorgung dar.

### 1.1.4 Energiewirtschaftlicher Rahmen

Der energiewirtschaftliche Rahmen ist derzeit gekennzeichnet durch eine Liberalisierung der Elektrizitäts- und Erdgasmärkte, innerhalb der Europäischen Union und weltweit. Die Bedeutung großer Kraftwerke nimmt eher ab. Damit nimmt der Trend hin zu kleineren, verbrauchernah und auch außerhalb von Ballungsräumen installierten Energieumwandlungsanlagen zu. Dazu gehört auch die parallele Bereitstellung von Elektrizität und Wärme in Kraft-Wärme-Kopplung etwa in Blockheizkraftwerken mit entsprechend hohen Gesamtnutzungsgraden. Fossil als auch regenerativ bestückte Kleinanlagen lassen sich prinzipiell mithilfe moderner IuK-Technologien zu virtuellen Kraftwerken zusammenschalten zum Ausgleich von Lastspitzen durch ein ausdifferenziertes Energiemanagement.

Durch die Liberalisierung der Elektrizitätsmärkte werden derzeit Energieumwandlungstechnologien begünstigt, die keine hohen Investitionen erfordern und relativ geringe Betriebskosten aufweisen. Dies sind zurzeit Erdgaskraft-

[9] Eine Einzelbetrachtung erneuerbarer sowie „sensibler“ nicht erneuerbarer Energieträger findet sich in TAB 2000 und in Basler & Hofmann 2001.

[10] Beispielsweise werden seitens der EU als Referenzwert für den Anteil von Strom aus erneuerbaren Energiequellen am Bruttostromverbrauch bis zum Jahr 2010 22 % angegeben, das nationale Richtziel für Deutschland beträgt 12,5 % (EU 2001).

werke. Inwieweit in Zukunft alternative, umweltschonendere Energieumwandlungstechnologien kostengünstig in den Markt eingebracht werden können, hängt zum einen von der Ausschöpfung von Kostenreduktionspotenzialen und zum anderen von umwelt- und energiepolitischen Rahmenbedingungen ab. Entscheidend für eine weitere Verfolgung der Option Kernfusion ist nicht deren immenses quantitatives Potenzial, Energie bereitzustellen, sondern die gewählte Strategie zur Energieversorgung im Jahre 2050.[11]

Fusionskraftwerke eignen sich für ein Umfeld, das über gut ausgebaute elektrische Versorgungsnetze verfügt. In eine solche Infrastruktur lassen sich am ehesten große Grundlastkraftwerke einbinden. Ein ausgebautes Elektrizitätsverteilungsnetz ist auch in Zukunft notwendig, etwa für ein differenziertes Energiemanagement zum Ausgleich von Angebotsschwankungen fluktuierender Energieträger. Andererseits wird durch die Zunahme dezentraler, kleiner Anlagen der Ausbau des Stromversorgungsnetzes in industrialisierten Ländern eher abnehmen. In den Industrieländern bestehen bereits feste Versorgungsstrukturen für Elektrizität, die sich nur relativ langsam verändern. In Schwellen- und Entwicklungsländern hingegen werden sich diese aufgrund des erwarteten Energiezuwachses deutlich schneller verändern.

## 1.2 Option Kernfusion

Kernfusionskraftwerke eignen sich für die Bereitstellung von Grundlaststrom in stark urbanisierten Regionen mit einer gut ausgebauten Infrastruktur. Die Nutzung von Kernfusion entspricht damit einer zusätzlichen Möglichkeit, Grundlaststrom zu erzeugen, welcher auch weiterhin benötigt wird. Ausgehend von der zunehmenden Bedeutung der Versorgung von Ballungsgebieten (aufgrund des erwarteten weltweiten Bevölkerungswachstums) könnten Fusionsanlagen diese (nah beim Verbraucher) mit Elektrizität beliefern, während bei der Versorgung von Regionen mit geringer Bevölkerungsdichte andere Energieträger, wie etwa erneuerbare, im Vordergrund stehen könnten (Vetter 2001).

Die Kernfusion stellt aus heutiger Sicht eine verhältnismäßig teure Energiequelle dar, die erhebliche Investitionen erfordert (Kap. VI). Die wirtschaftliche Ausgangslage für Fusionskraftwerke würde sich auf längere Sicht erst dann verändern, wenn sich das Angebot fossiler Energieträger verknappt und diese sich damit deutlich verteuern würden. Kernfusion kommt in diesem Fall vor allem als Vorsorgeoption für eine fernere Zukunft, in der Reserven und Ressourcen fossiler Energieträger weitgehend erschöpft sind, in Betracht.

Darüber hinaus könnten durch den Einsatz von Kernfusion andere Energieträger geschont bzw. anderweitig eingesetzt werden. So könnten fossile Brennstoffe und Biomasse anstatt zur Energiegewinnung aufgrund anderer Ressourcenqualitäten, z. B. für die chemische Industrie, genutzt werden.

### 1.2.1 Kernspaltung und Kernfusion

Aus technischer Sicht stellen Spaltkraftwerke eine mögliche Alternative zu Fusionskraftwerken dar. Die Uranvorkommen reichen bei gleichbleibendem Ausbau der Kernenergienutzung und Akzeptanz für steigende Rohstoffpreise voraussichtlich deutlich über das 21. Jahrhundert hinaus aus (Basler & Hofmann 2001). Im Gegensatz zur Fusionstechnologie kann auf Erfahrungen aus bestehenden Anlagen zurückgegriffen werden. Fortgeschrittene Konzepte für Spaltkraftwerke, z. B. für einen heliumgekühlten Hochtemperaturreaktor, verfügen zum Teil über gute Sicherheitseigenschaften (Lako 1999). Sollte künftig ein Bedarf an nuklearen Energiesystemen bestehen, weisen Fusionsanlagen jedoch potenziell gegenüber anderen fortgeschrittenen Nuklearsystemen deutliche Vorteile bei Sicherheit und Umweltschutz auf (Liebert 2001). In vielen Industrienationen trifft Kernspaltung heute jedoch auf geringe Akzeptanz.

### 1.2.2 Regenerative Energieträger und Kernfusion

Regenerative Energieträger und Kernfusion werden für 2050 oft in einer gewissen Konkurrenz zueinander diskutiert. Gemeinsam ist beiden Optionen, eine $CO_2$-freie Umwandlung von Energie und ihre Zuordnung zu den so genannten „Zukunftstechnologien“ bzw. „Energieträgern der Zukunft“, sodass sie prinzipiell Bausteine für eine von fossilen Energieträgern unabhängige Energieversorgung darstellen. Bei einer vergleichenden Diskussion ist die jeweils verwendete Vergleichsebene wichtig: unter dem Aspekt der Erzeugung von Grundlaststrom wäre diese bei denjenigen regenerativen Energieträgern anzusetzen, die sich auch für die Erzeugung von Grundlaststrom in größeren Anlagen eignen (z. B. Erdwärme, Laufwasserkraftwerke, Biomasse). Dagegen ist unter dem Aspekt der gesamten Energieversorgung auf nationaler und globaler Ebene, wo etwa Versorgungssicherheit oder Treibhausgasemissionen insgesamt strategisch betrachtet werden, eher von der gesamten Menge regenerativer Energieträger auszugehen.

Regenerative Energieträger werden bereits heute zur Stromerzeugung – in Deutschland mit Ausnahme der Geothermie – genutzt. Ihr Einsatz kommt dem aktuellen Trend des liberalisierten Energiemarktes hin zu kleinen Anlagengrößen entgegen. Ausnahmen bilden hier große Wasserkraftwerke und Off-Shore-Windparks; praktikable Leistungsgrößen von Geothermie-Anlagen zur Grundlast-Stromerzeugung in Deutschland sind momentan noch offen. Kernfusionsanlagen stellen dagegen ausschließlich Großanlagen zur Energieumwandlung dar. Dennoch ist auch eine Koexistenz beider Optionen der Energiebereitstellung denkbar, etwa aus Klimaschutzgründen (Kap. IV.2) oder aus Sicht einer angestrebten Versorgungssicherheit mit einer entsprechend verfügbaren Technologievielfalt.

[11] Die aktuelle Energiepolitik in Deutschland legt Schwerpunkte auf den Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie und auf die verstärkte Etablierung regenerativer Energieträger (z. B. Gesetz zur geordneten Beendigung der Kernenergienutzung zur gewerblichen Erzeugung von Elektrizität, Bundestagsdrucksache 14/6890; Erneuerbare-Energien-Gesetz, Bundestagsdrucksache 14/2341).

### 1.2.3 Fossile Energieträger und Kernfusion

Ein nach momentanem Erkenntnisstand auch noch länger zur Verfügung stehender und auch für die Grundlastversorgung genutzter fossiler Energieträger ist die Kohle. Auf dessen verstärkte Nutzung setzen – zumeist aus finanziellen Gründen – bereits einige aus Sicht des wachsenden Energiebedarfs bedeutende außereuropäische Nationen wie China und Indien,[12] die insbesondere die Optionen der Energiegewinnung aus Steinkohle ausbauen. Fusionskraftwerke würden sich gut in die künftigen Versorgungsinfrastrukturen dieser Länder einpassen und könnten dabei zur Verminderung klimaschädigender Emissionen beitragen (Bradshaw 2001).

Bei den derzeit eingesetzten fossilen Energieträgern können Nutzungskonkurrenzen (z. B. beim Erdgas) und zunehmende Importabhängigkeiten (z. B. beim Erdöl) entsprechend der Reservelage und politischen Gegebenheiten zu erhöhten wirtschaftlichen, ökologischen, sozialen oder politischen Aufwendungen führen. Auch bei regenerativen Energieträgern könnten Bedarfszwänge beispielsweise die Notwendigkeit ergeben, Anlagen zur Nutzung der Windenergie an weniger geeigneten Standorten zu betreiben. Im Sinne einer ausreichenden Versorgungssicherheit wird auch um 2050 daher voraussichtlich die Nutzung verschiedenster Energieträger (Holdren 1995) vorteilhaft sein. Fusionskraftwerke könnten zu einem Energiemix beitragen, der robust gegenüber unterschiedlichen politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen ist.

## 2. Kernfusion und Klimaschutz

Die Einbettung der Option Kernfusion in die übergreifende Diskussion von Nachhaltigkeit (Kopfmüller et al. 2001) ist ein wesentlicher Bestandteil der Frage nach ihrem Bedarf. Klimaschutz steht dabei für einen politisch wichtigen, dennoch auf die ökologische Dimension einer nachhaltigen Energiewirtschaft reduzierten Aspekt.

Während des Betriebes emittieren Fusionskraftwerke keine klimaschädigenden Gase. Allerdings ist zur Errichtung von Fusionskraftwerken insbesondere zur Herstellung von Werkstoffen, wie etwa Beton, Energie erforderlich. Wird diese Energie auf fossiler Basis bereitgestellt, ist dies mit dem Ausstoß von Treibhausgasen verbunden. Basiert diese auf $CO_2$-freien Energieträgern, fällt die Lebenszyklusanalyse einer Fusionsanlage im Hinblick auf den Klimaschutz entsprechend vorteilhaft aus (Kap. VII.2.2). Fusionskraftwerke enthalten zusätzlich ein radioaktives Inventar, das mit Emissionen im Normalbetrieb, Unfallrisiken und der Notwendigkeit, radioaktive Abfälle zu entsorgen, verbunden ist (Kap. VII).

Die Konkurrenzfähigkeit von Kernfusionsstrom ist eng mit den Anforderungen an den Klimaschutz gekoppelt, die vor allem in Ländern erhoben werden, welche bereits ein gewisses Wohlstandsniveau erreicht haben (Lako 1999). Kernfusion wird daher auch vielfach als Energiequelle für wirtschaftlich entwickelte Länder, etwa die heutigen Mitglieder der Organisation for Economic Co-Operation and Development, OECD, eingestuft. Auch wenn die steigende Energienachfrage im Jahre 2050 angebotsseitig prinzipiell durch die Nutzung fossiler und regenerativer Energieträger abdeckbar ist, bleibt die Frage der Gewichtung des Klimaschutzes zunächst noch offen. Dabei wären tendenziell zwei Entwicklungsrichtungen denkbar:

Bei vergleichsweise hoher Gewichtung des Umwelt- und Klimaschutzes müssten Fusionskraftwerke um 2050 in einem Umfeld positioniert werden, das dann wahrscheinlich durch die intensive Nutzung erneuerbarer Energien gekennzeichnet ist. Hinzu käme, dass in diesem Fall wahrscheinlich auch der Energiebedarf insgesamt geringer ausfallen würde. Um Verfügbarkeitsschwankungen fluktuierender Energieträger auszugleichen, böte sich ein differenziertes Energiemanagement an, dass verschiedene Regionen und Energieträger integriert (Lehman 2001). Zusätzlich würden voraussichtlich schnell regelbare Kraftwerke mit höherer Verfügbarkeit benötigt werden, wobei z. B. auf Wasserkraft oder auf nicht erneuerbare Energien zurückgegriffen werden kann. Da Fusionskraftwerke auf einen gleichmäßigen Dauerbetrieb ausgelegt sind, würden sie diese Funktion kaum erfüllen.

Bei vergleichsweise geringer Gewichtung des Klima- und Umweltschutzes würde sich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts voraussichtlich ein Bedarf an preisgünstigen (neuen) Energiequellen einstellen. Die wachsende Nachfrage nach Energie würde sich dann zwar vorteilhaft auf die Entwicklungschancen der Kernfusion auswirken, da diese geeignet ist, zusätzlich große Energiemengen bereitzustellen. Andererseits wäre Kernfusionsstrom nach heutigem Erkenntnisstand bis 2050 mit Strom, der aus anderen Grundlastanlagen (etwa Kohle- oder Gaskraftwerken) erzeugt wurde, nicht konkurrenzfähig[13] (Kap. VI).

Kernfusion stellt eine Option zur Verminderung von Treibhausgasen dar. Ob Kernfusionsanlagen um 2050 noch einen Beitrag zum Klimaschutz leisten können, ist wesentlich abhängig von der Frage des dann erreichten Umsetzungsgrades ambitionierter, technisch gesehen möglicher Ziele etwa bei den Optionen verstärkter Nutzung regenerativer Energieträger, beim Energieproduktivitätszuwachs[14] und bei verbraucherseitigen Maßnahmen.[15]

Beim Themenfeld Klimaschutz muss unterschieden werden zwischen unmittelbar anstehenden Aufgaben,

[12] Allein Indien wird seinen Energieverbrauch in diesem Jahrhundert etwa um einen Faktor sechs steigern; für China gilt Ähnliches (Bosch/Bradshaw 2001).

[13] Diese Aussage gilt nur, sofern nicht energiepolitische Maßnahmen zum Umweltschutz (z. B. Besteuerung des Kohlendioxidausstoßes) greifen, die Vorteile für kohlendioxidfreie Energieumwandlungstechnologien wie die Kernfusion mit sich bringen.

[14] Eine Verdopplung des Energieproduktivitätszuwachses von gegenwärtig 1 auf 2 % p. a. sei möglich und würde alle Energie- und Emissionsprobleme lösen (Hennicke 2001).

[15] Auch wenn 2050 der überwiegende Anteil der Energie (über 60 %) aus regenerativen Quellen stammt, würde sich der $CO_2$-Ausstoß in dieser Zeit verdoppeln, wenn nicht nachfrageseitige Maßnahmen getroffen würden (Hennicke 2001).

z. B. Kyoto-Protokoll, $CO_2$-Reduzierungsverpflichtung der Bundesregierung, und längerfristigen, die davon abhängen, inwieweit Effizienzsteigerungen, Ausbau der Nutzung regenerativer Energiequellen und Umsetzung von Energieeinsparpotenzialen erfolgen. Da mit der Inbetriebnahme erster Fusionskraftwerke nicht vor der Mitte des 21. Jahrhunderts zu rechnen ist, wird Kernfusion keinen Beitrag zur Lösung aktueller Probleme des Klimaschutzes leisten können. Fusionskraftwerke könnten jedoch in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts eine Energieversorgung unterstützen, die frei von klimaschädigenden Auswirkungen ist.

## V. Ist Kernfusion sicher?

Die Entwicklung der Fusionstechnologie wird von der Erkenntnis geleitet, dass Fusionskraftwerke nur bei Einhaltung strenger Sicherheitsziele in Betrieb gehen werden. Ein zentrales Ziel ist es daher, dass Fusionskraftwerke keine Unfälle erlauben sollen, die mit wesentlichen Gefährdungen für die Bevölkerung außerhalb des Betriebsareals verbunden sind und etwa eine Evakuierung erforderlich machen würden. Anders gesagt: Fusionsreaktoren sollen inhärent sicher sein.

### 1. Mögliche Unfälle

Ein wesentlicher Unterschied zu Spaltungsreaktoren besteht darin, dass unkontrollierte nukleare Kettenreaktionen in Fusionskraftwerken naturgesetzlich ausgeschlossen sind. Dennoch könnte die Freisetzung auch nur eines geringen Bruchteils des radioaktiven Inventars eines Fusionskraftwerks zu einem katastrophalen Unfallszenario führen (Liebert 1999). Die Menge des radioaktiven Inventars ist in etwa vergleichbar mit der eines Spaltungsreaktors derselben Leistung. Der überwiegende Teil des Inventars befindet sich in aktivierten Strukturmaterialien. Aber auch das Tritium ist von großer Bedeutung, da es sehr mobil und im Fall einer Freisetzung schwer beherrschbar ist. Es kann auch vor allem in Form von tritiertem Wasser leicht in den Körper aufgenommen werden.

Welche Art von Unfällen mit welcher Wahrscheinlichkeit eintreten könnten und in welchem Umfang das radioaktive Inventar in diesem Fall freigesetzt werden könnte, ist jedoch in der Literatur umstritten (Holdren et al. 1987; Öko-Institut 1995; Raeder et al. 1995). Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass Annahmen zum Reaktordesign gemacht werden müssen, da das endgültige Design der ersten stromerzeugenden Fusionsreaktoren noch nicht feststeht. Dass das eingangs genannte Ziel der inhärenten Sicherheit erreicht werden kann, ist somit zurzeit weder eindeutig bewiesen noch klar widerlegt, sondern hängt von den Ergebnissen einer noch über Jahrzehnte zu leistenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit ab (Heindler 2001).

### 2. Gewaltsame Einwirkungen Dritter

Bei der Zerstörung eines Fusionskraftwerks durch kriegerische Ereignisse oder Terrorismus würde voraussichtlich ein erheblicher Teil des radio- und chemotoxischen Inventars freigesetzt. Da der überwiegende Teil des Inventars in Strukturmaterialien gebunden ist, käme es auf das konkrete Ereignisszenario an, welcher Anteil davon tatsächlich freigesetzt würde. Wird angenommen, dass der leicht mobilisierbare Tritiumanteil in einem Fusionskraftwerk durch gewaltsame Einwirkung, etwa den Absturz eines großen Verkehrsflugzeugs oder kriegerische Ereignisse, vollständig freigesetzt wird, wären Evakuierungen der Bevölkerung auf einigen Quadratkilometern Fläche erforderlich. Es wird angenommen, dass die Individualdosen auch bei ungünstigen Rahmenbedingungen auf 250 mSv[16] begrenzt werden könnten (Samm 2001). Bisherige Designkonzepte sehen keine besonderen Vorkehrungen für den Schutz vor einer derartigen gewaltsamen Einwirkung vor.

### 3. Weiterverbreitung von Kernwaffen

Fusionskraftwerke tragen zur Proliferation bei, wenn mit ihrer Hilfe Material gewonnen wird, das direkt oder nach weiteren Verarbeitungsschritten zur Herstellung von Kernwaffen eingesetzt werden kann. Ebenfalls zu den Proliferationsrisiken zählen die Aneignung und der Umgang mit Schlüsseltechnologien für die Entwicklung von Kernwaffen.

Bei Kernfusion mit magnetischem Einschluss sind insbesondere zwei Faktoren für eine mögliche Proliferation relevant: das in der Anlage als Brennstoff verwendete Tritium und die Möglichkeit, mithilfe der in der Fusionsreaktion erzeugten Neutronen spaltbare Materialien zu erbrüten (Europäisches Parlament 1999).

#### 3.1 Tritium

Tritium wird in verschiedenen fortgeschrittenen Kernwaffendesigns eingesetzt. Tritium ist damit von besonderer Bedeutung für die vertikale Proliferation, d. h. die Weiterentwicklung der Kernwaffenarsenale. Es hat aber auch Bedeutung für die horizontale Proliferation, d. h. die Weiterverbreitung von Kernwaffen. Zum Beispiel kann durch Tritium in so genannten Boosterbomben die Energiefreisetzung aus einer Spaltwaffe bis zum Zehnfachen erhöht werden. Auf diese Weise benötigt man geringere Mengen an spaltbarem Material, um wirksame Kernwaffen herzustellen (Liebert 2001). Zudem wird darüber spekuliert, dass Boosting die Einsatzfähigkeit von Waffen, die Reaktorplutonium aus der zivilen Produktion enthalten, verbessern könnte (Liebert 2001).

Um Tritium aus einer Fusionsanlage abzuzweigen, müssten zunächst die tritiumbegrenzenden Barrieren geöffnet werden, was im Normalbetrieb nur schwer möglich wäre (Bradshaw 2001). Ein erhöhtes Risiko dürfte im Verlauf von Wartungs- und Reparaturarbeiten bestehen. Einen möglichen Schwachpunkt stellt zudem die Brennstoff-

[16] Die Einheit mSv (Millisievert) bezeichnet die von einem Organismus aufgenommene Strahlungsenergie je Masseneinheit (mJ/kg) unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Wirksamkeiten verschiedener Strahlungsarten (Äquivalentdosis). Die natürliche Strahlenexposition liegt in Abhängigkeit vom Wohn- und Arbeitsort bei etwa 1 bis 5 mSv pro Jahr.

fabrikation und -handhabung dar. Die genaue Bilanzierung des Tritiuminventars in einer Fusionsanlage ist schwierig. Zudem können einige Gramm Tritium leicht mit tragbaren Speichern transportiert werden, die mit heute etablierten Kontrolltechniken kaum zu detektieren sind. Tritium stellt daher ein wesentliches Proliferationsrisiko beim Betrieb von Fusionsreaktoren dar.

### 3.2 Spaltbare Materialien

Fusionskraftwerke benötigen für ihren Betrieb kein spaltbares Material. Fusionskraftwerke produzieren jedoch beträchtliche Neutronenflüsse, die es ermöglichen, spaltbares Material zu erbrüten. Zu diesem Zweck sind Modifikationen an der Anlage, insbesondere am Brutmantel, erforderlich, die je nach Design mit unterschiedlichem Aufwand detektierbar sind. Um sicherzustellen, dass kein spaltbares Material in Fusionskraftwerken produziert wird, muss verhindert werden, dass der Brutmantel entsprechend abgeändert wird (OTA 1987).

Den Eintrag kleiner Mengen an Brutmaterial oder die Entnahme kleiner Mengen Spaltmaterial aus einer Fusionsanlage feststellen zu können, erscheint realistisch (Raeder et al. 1995), da normalerweise in einem Fusionskraftwerk kein derartiges Material vorhanden ist. Verschiedene Autoren betonen auch, die teilweise Nutzung der Neutronenflüsse zur Produktion von Waffenmaterial sei verhältnismäßig leicht nachweisbar (Liebert et al. 1999). Um entsprechende Aktivitäten rechtzeitig zu entdecken, müssten jedoch zumindest angemessene Überwachungskonzepte entwickelt werden (Liebert 2001). Das Risiko der Erbrütung waffenfähiger spaltbarer Materialien ist also insgesamt bei einem reinen Fusionsreaktor als eher niedriger einzuschätzen als bei einem Spaltreaktor.

## VI. Ist Strom aus Kernfusion wirtschaftlich?

Nach heutigen Vorstellungen sollen kommerzielle Fusionskraftwerke um die Mitte des Jahrhunderts in Betrieb gehen können. Es existieren eine Reihe von quantitativen Prognosen zu den erwarteten Stromgestehungskosten dieser Anlagen (z. B. Delene 1999; Najmabadi 1999; Peterson 1998; Sheffield 2000). Um solche Prognosen abgeben zu können, müssen für einen 50-Jahres-Zeitraum eine Reihe von kritischen, z. T. stark fluktuierenden Parametern vorhergesagt werden, beispielsweise Energieträgerpreise, Preise für Rohstoffe (Lithium, seltene Metalle) sowie Zinssätze. Diese Faktoren haben ebenso wie z. B. die Bauzeit eines Reaktors und Prozeduren für Genehmigung und Betriebsaufsicht (z. B. Sicherheitsauflagen, Rückstellungen für Entsorgung) einen profunden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit.

Hinzu kommt, dass in 50 Jahren möglicherweise ans Netz gehende Fusionsreaktoren sehr wahrscheinlich höchstens eine entfernte Ähnlichkeit mit den Designstudien, die heute zugrunde gelegt werden, aufweisen werden. Bei dieser Ausgangslage können Wirtschaftlichkeitsanalysen für Fusionskraftwerke am ehesten für die Kostenoptimierung verschiedener Design-Varianten herangezogen werden.

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Fusionsstrom gegenüber konkurrierenden Energieträgern und die Nennung von Stromgestehungskosten sind dagegen vor diesem Hintergrund höchst spekulativ.[17] Allein die Geschwindigkeit des technologischen Fortschrittes und die Kostenentwicklung bei konkurrierenden, z. B. regenerativen Energiesystemen, die von immenser Bedeutung für deren Konkurrenzfähigkeit ist, entziehen sich der langfristigen Vorhersagbarkeit.

Als sicher gilt, dass die Investitionen gegenüber den Betriebskosten die Stromgestehungskosten dominieren werden. Für eine Anlage mit 1 000 $MW_e$ werden 5 bis 6 Mrd. Euro[18] angegeben (Delene 1999). Fusionskraftwerke werden damit sehr kapitalintensive Großprojekte sein. Der Vergleich mit anderen Großprojekten – z. B. dem „Schnellen Brüter“ – legt nahe, dass sich die Kostenschätzungen eher am unteren Rand des Möglichen bewegen (Ziesing, nach Deutscher Bundestag 2001). Selbst die Befürworter der Kernfusionstechnologie gehen davon aus, dass die Stromgestehungskosten aus heutiger Sicht eher höher als bei konkurrierenden Technologien liegen werden (Delene 1999).

Faktoren, die diese Relation zugunsten der Fusion verschieben könnten, wären z. B. ein besonders hoher gleichmäßiger Bedarf an Elektrizität sowie hohe Energiepreise. Diese beiden Faktoren sind jedoch nicht unabhängig voneinander. Ein langfristiges Ansteigen der Energiepreise würde die Entwicklung von Technologien und Maßnahmen zur Energieeinsparung stimulieren und somit den Energieverbrauch dämpfen.

### Externe Kosten

Eine möglichst vollständige Internalisierung externer Kosten der Energienutzung, etwa im Zuge einer starken Gewichtung des Klimaschutzes, wäre günstig für die Wettbewerbsfähigkeit nicht-fossiler Energieträger. In ersten Untersuchungen zu den externen Kosten der Fusionsenergie wurde gezeigt, dass Materialbearbeitung, Bau und Stilllegung eines Fusionskraftwerks gegenüber dem Betrieb von wesentlicher Bedeutung sind. In der Gesamtbilanz werden die externen Kosten der Energiegewinnung durch Kernfusion als vergleichbar mit Windenergie, Photovoltaik und Kernspaltung, aber wesentlich günstiger als bei der Energiegewinnung mit fossilen Energieträgern eingestuft (Schleisner/Korhonen 1998).

### Fusionsstrom aus der EVU-Perspektive

In vielen Charakteristiken – Leistungsklasse von 1 000 $MW_e$, hohe Kapitalintensität und lange Kapitalbindung – ähneln zukünftige Fusionskraftwerke Kernspaltungskraftwerken. Sie werden sich daher, wie gesagt, hauptsächlich für die zentralisierte Stromerzeugung in der Grundlast eignen.

[17] Ein anschauliches Beispiel, wie katastrophal Langzeitprognosen fehlschlagen können, bietet die 1954 getroffene Aussage von Lewis L. Strauss, dem Vorsitzenden der Atomic Energy Commission, Kernenergiestrom sei in Zukunft „too cheap to meter“ (New York Times 1954).

[18] Preisbasis 1999. Dies ist weniger als die für DEMO veranschlagten 8 Mrd. Euro, da in einem Kraftwerk keine kostenintensiven Analyse- und Experimentiervorrichtungen – wie für DEMO – gebraucht werden.

Wie hoch der Bedarf an zentralisierter Grundlasterzeugung Mitte des Jahrhunderts sein wird, ist unklar (Kap. IV). Gegenwärtig findet ein Kapazitätsausbau hauptsächlich bei kleineren Einheiten nahe am Ort der Verbraucher statt. Dieser Trend der Dezentralisierung wird mit der Markteinführung von Brennstoffzellenkraftwerken sicherlich noch an Dynamik gewinnen. Für Grundlastkraftwerke ist die Zuverlässigkeit ein entscheidender Parameter. Häufige unvorhergesehene Unterbrechungen oder lange Stillstandszeiten für Wartung und Reparatur würden Fusionskraftwerke unattraktiv machen. Die heute angenommene Leistungsverfügbarkeit eines Fusionskraftwerkes von 75 % (Bradshaw 2001) ist gegenüber anderen Großkraftwerken, die zum Teil über 95 % erreichen, vergleichsweise niedrig.

Wenn der gegenwärtige weltweit starke Trend zur Liberalisierung der Energiemärkte anhält, wäre die hohe Kapitalintensität ein gewichtiger Nachteil für Fusionskraftwerke, da lange Kapitalbindungen in einem liberalisierten Umfeld nicht vorteilhaft sind. Dazu kommt, dass Fusionskraftwerke am Anfang mit zumindest teilweise bereits abgeschriebenen Reaktoren, die zu Grenzkosten produzieren können, zu konkurrieren hätten. Energieversorgungsunternehmen werden Fusionskraftwerke nur dann annehmen, wenn sie einen eindeutigen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber etablierten Technologien erwarten lassen, einschließlich eines Risikoaufschlages wegen der noch unbekannten Leistungsfähigkeit/Zuverlässigkeit einer jungen Technologie.

Insgesamt ist daher umstritten, ob auf DEMO bereits Fusionskraftwerke folgen, die wirtschaftlich konkurrenzfähig betrieben werden können. Möglicherweise werden Anfangsschwierigkeiten eine weitere staatliche Unterstützung erforderlich machen (Heindler 2001).

## VII. Ist Strom aus Kernfusion umweltfreundlich?

Ein erheblicher Vorteil der Energiegewinnung durch Kernfusion liegt darin, dass beim Fusionsprozess keine klimaschädigenden Treibhausgase entstehen. Eine funktionierende Fusionstechnologie wäre daher geeignet, in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts einen Beitrag zur Vermeidung von Klimaveränderungen zu leisten. Dies wird im Zusammenhang mit der Frage nach dem Bedarf an Fusionsenergie ausführlich in Kap. IV.2 diskutiert.

Auf der anderen Seite entstehen beim Betrieb von Fusionskraftwerken radioaktive Abfälle. Wie diese zu bewerten sein werden, hängt vom Erreichen anspruchsvoller Ziele bei der Weiterentwicklung der Technologie und der verwendeten Materialien in den nächsten Jahrzehnten ab.

Es ist abzusehen, dass die gesellschaftliche Akzeptanz der Fusionstechnologie in hohem Maße davon abhängen wird, dass Umweltkriterien angemessen berücksichtigt werden zum Zeitpunkt, wo Technologieentscheidungen gefällt werden.

### 1. Radioaktivität

Im Gegensatz zur Kernspaltung sind die Reaktionsprodukte der Deuterium-Tritium-Fusion selbst nicht radioaktiv. Damit verbindet sich die Hoffnung, dass Fusionskraftwerke konstruiert werden können, bei denen langlebiger hochradioaktiver Abfall, der über viele Generationen von der Biosphäre abgeschirmt werden muss, nicht entsteht. Im Reaktor sind jedoch Anlagenteile den bei der Fusionsreaktion freigesetzten Neutronen ausgesetzt und werden von diesen aktiviert. Wie viel und welche Art von Radioaktivität dabei entsteht, hängt in hohem Maße von der Wahl der Materialien ab, aus denen diese Anlagenteile konstruiert sind. Der in den Reaktoren erzeugte radioaktive Abfall stellt sicherlich das radiologische Hauptproblem bei der Kernfusion dar.

Das zweite wesentliche radiologische Risiko ist der Brennstoff Tritium. Aufgrund seiner besonderen Eigenschaften ist der Umgang mit diesem Stoff nicht unproblematisch. Im Folgenden werden die Risiken durch die Aktivierungsprodukte und das Tritium sowie die Emissionen im Normalbetrieb und bei der Stilllegung näher beleuchtet.

### 1.1 Aktivierungsprodukte

Das radioaktive Inventar an aktivierten Materialien ist vor allem in den Strukturen der ersten Wand, des Brutmantels und der Divertoren enthalten. Es hängt sehr stark von den gewählten Materialien ab. Wie bereits ausgeführt (Kap. II.3), werden an diese Materialien eine Vielzahl von schwierig zu erreichenden Anforderungen gestellt. Die Entwicklung dieser Materialien stellt eine der wesentlichen technologischen Herausforderungen für den Erfolg der Fusionstechnologie dar. Die niedrige Aktivierbarkeit ist dabei nur einer von mehreren Parametern, die nicht unabhängig voneinander optimierbar sind, sondern zwischen denen es „trade-offs“ gibt. Welchen Stellenwert das Kriterium der Vermeidung von langlebigen radioaktiven Abfällen bei den Technologieentscheidungen für Reaktormaterialien einnimmt, ist unklar.

Für ein Referenzdesign wird das Inventar in der SEAFP-Studie auf $1{,}7 \cdot 10^{20}$ bis $1{,}3 \cdot 10^{21}$ Bq geschätzt[19] (Raeder et al. 1995; Schaper 1999). Zum Vergleich: Eine Tonne Uran weist eine Radioaktivität von $10^{10}$ Bq und eine Tonne Brennstäbe im Reaktorbetrieb von $10^{19}$ Bq auf (Heinloth 1997). Das radioaktive Inventar eines Spaltkraftwerks mit einer elektrischen Leistung von 1 300 MW erreicht nach ungefähr einjähriger Betriebszeit eine Sättigungsaktivität von etwa $10^{20}$ Bq (Lederer/Wildberg 1992).

Das radiologische Risiko wird jedoch nicht nur durch die Aktivität, sondern wesentlich durch Faktoren wie Mobilisierbarkeit, Ausbreitungseigenschaften und Radiotoxizität der beteiligten Nuklide bestimmt. Auf längere Sicht sind die aktivierten Strukturmaterialien eines Fusionskraftwerks radiotoxisch weniger relevant als die entsprechenden Materialien aus einem Spaltreaktor (Liebert et al. 1999).

[19] Die Einheit Becquerel, Bq, bezeichnet die Anzahl der radioaktiven Umwandlungen in einer Sekunde.

Für die Gesamtmenge an radioaktiven Abfällen, die bei Betrieb und Stilllegung eines Fusionskraftwerks entstehen, existiert ein breites Spektrum von Schätzwerten. Im Allgemeinen wird mit Massen von 50 000 bis 100 000 t gerechnet, davon etwa 25 000 t aus dem routinemäßigen Austausch von Komponenten wie Brutmantelmodulen und Divertoren. Wenn die Standzeiten der plasmanahen Komponenten geringer als erhofft ausfallen sollten, wäre mit einer entsprechenden Erhöhung der endzulagernden Abfälle zu rechnen (Liebert et al. 1999). Die Menge der radioaktiven Abfälle ist somit mit derjenigen aus einem Spaltkraftwerk ähnlicher Leistung vergleichbar.

Gemäß Empfehlungen der International Atomic Energy Agency, IAEA, können 30 bis 40 % der radioaktiven Abfälle aus einem Fusionskraftwerk voraussichtlich nach einer Abklingzeit von maximal 100 Jahren ohne Einschränkungen rezykliert oder konventionell entsorgt werden. Der restliche Abfall soll teilweise in neuen Fusionskraftwerken eingesetzt und teilweise der Endlagerung zugeführt werden (Bradshaw 2001). Der Anteil der Abfälle, die aufgrund ihres Anteils an langlebigen Nukliden in ein geologisches Endlager verbracht werden müssen, wird dabei auf einige wenige bis zu 30 oder mehr Prozent geschätzt (Bradshaw 2001; Liebert 2001).

Fortgeschrittene Materialien wie Vanadiumlegierungen oder Siliziumkarbid-Keramiken hätten gegenüber den zurzeit verwendeten hochreinen Stählen das Potenzial zu einer noch weitergehenden Vermeidung von langlebigen radioaktiven Abfällen, aber bis ihre Einsatzreife nachgewiesen ist, sind noch viele Jahre Entwicklungsarbeit notwendig.

### 1.2 Tritium

Der Umgang mit Tritium stellt wegen dessen besonderen Eigenschaften hohe Anforderungen. Tritium ist ein radioaktives Wasserstoffisotop, dessen Halbwertszeit 12,3 Jahre beträgt. Seine Zerfallsprodukte sind nicht radioaktiv. Die Reichweite der von Tritium ausgehenden β-Strahlung ist gering, sodass sie beispielsweise schon durch dünne Folien abgeschirmt werden kann und die menschliche Haut nicht durchdringt. Dem Menschen wird Tritium jedoch bei Aufnahme in den Körper, primär in Form tritiumhaltigen Wassers, das durch Verschlucken, Einatmen oder Hautkontakt inkorporiert wird, gefährlich.

Tritium ist sehr mobil und daher im Fall einer Freisetzung schwer beherrschbar. Es tritt rasch auch durch kleine Lecks aus und diffundiert – vor allem bei hohen Temperaturen – leicht in metallische Werkstoffe hinein und durch metallische Wände hindurch. In einem Fusionskraftwerk wird sich daher die erste Wand mit Tritium beladen. Bei JET wurde auch beobachtet, dass sich tritiumhaltiger Staub und Flocken entwickelten (GDCH 2001).

Das gesamte Tritiuminventar eines 1 000-MWe-Fusionskraftwerks mit magnetischem Einschluss wird der SEAFP-Studie zufolge etwa 2 kg betragen, was einer Aktivität von ca. $7 \cdot 10^{17}$ Bq entspricht (Raeder et al. 1995). Im Plasma und im Tritiumkreislauf befinden sich etwa 10 bis 100 g Tritium (Bradshaw 2001). Die weitaus überwiegende Menge ist in den Strukturmaterialien der ersten Wand und in Brennstoffspeichern enthalten (Schaper et al. 1999).

Für den Tritium-Einsatz in Fusionskraftwerken sind noch zahlreiche Fragen zu klären und technische Fortschritte in der Verfahrenstechnik erforderlich. Entwicklungsbedarf besteht beispielsweise bei der Tritiumanalytik und Verfahren zur Dekontamination tritiumhaltiger Oberflächen und Kühlwasser.

Solange keine Erfahrungen mit dem großskaligen Umgang mit Tritium vorliegen, sind Aussagen zu radiologischen Risiken mit großen Unsicherheiten behaftet (Heindler 2001).

### 1.3 Radiologische Emissionen im Normalbetrieb und bei der Stilllegung

Die radiologischen Emissionen eines Fusionskraftwerks im Normalbetrieb werden voraussichtlich von Tritium dominiert sein. Jedoch können auch Aktivierungsprodukte, vor allem durch Korrosionsprozesse, ins Abwasser freigesetzt werden (Weisse et al. 2000). Über die voraussichtliche Höhe der Emissionen kommerzieller Reaktoren kann beim heutigen Entwicklungsstand keine präzise Aussage gemacht werden (Vetter 2001).

Die Annahme, dass ein Fusionskraftwerk im Normalbetrieb maximal 2 g Tritium jährlich in die Umgebung freisetzen wird (IPP 1995), wird von Kritikern der Fusionsforschung ernsthaft bezweifelt. Die Bedenken können wahrscheinlich erst ausgeräumt werden, wenn mit realistisch großen Tritiummengen und reaktorrelevanten Anlagenkomponenten experimentiert würde (Liebert et al. 1999).

In der SEAFP-Studie wurde für die am stärksten exponierten Personen in der Umgebung eines Fusionskraftwerks ein Grenzwert von 0,05 mSv/a als Zielvorgabe formuliert. Die Untersuchung kam zu dem Ergebnis, dass dieser Wert voraussichtlich deutlich unterschritten werden wird, wobei sowohl die Abgaben über die Luft als auch über das Abwasser einbezogen sind (Raeder et al. 1995). Die Novelle der Strahlenschutzverordnung lässt eine Belastung der Bevölkerung durch zielgerichtete Nutzung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlung mit maximal 1 mSv (zuvor 1,5 mSv) jährlich zu. Die natürliche Strahlenexposition liegt in Abhängigkeit vom Wohn- und Arbeitsort bei etwa 1 bis 5 mSv pro Jahr.

Die Dosen für Beschäftigte innerhalb der Anlagen werden wesentlich davon abhängig sein, inwieweit aktivierte Teile der Anlage gewartet, repariert oder ersetzt werden müssen und inwieweit es gelingt, solche Arbeiten zu automatisieren. Aussagen über die zu erwartende Belastung von Arbeitnehmern sind ohne Kenntnis des spezifischen Anlagendesigns nur begrenzt möglich (Raeder et al. 1995). Neben der klassischen Untersuchung von Normalbetrieb und Unfall muss eventuell für Tritium eine weitere Kategorie in die Risikobetrachtung einbezogen werden: kurzfristig erhöhte Emissionen, die mit speziellen Prozeduren – z. B. dem Auswechseln von Komponenten der

ersten Wand – in der Anlage verbunden sind. Diese Emissionen sind auch bei der Belastung der Bevölkerung im Normalbetrieb zu berücksichtigen (Heindler 2001).

## 2. Ressourcenverbrauch

### 2.1 Brennstoffe

Die heute bevorzugten Fusionsbrennstoffe, Deuterium und Tritium, das aus Lithium gewonnen wird, sind weltweit in großen Mengen vorhanden.

Deuterium, das im Wasser natürlicherweise in einer Konzentration von 33 g pro t vorkommt, kann beispielsweise durch Elektrolyse aus Meerwasser extrahiert werden. Die entsprechenden Techniken sind bereits in größerem Maßstab erprobt. Der Deuteriumgehalt der Meere reicht potenziell aus, um den weltweiten Strombedarf auf dem Niveau des Jahres 1995 für 150 Mrd. Jahre zu decken (Ongena/van Oost 2000).

Tritium kommt in der Natur nur in geringsten Mengen vor und wird daher mithilfe von Neutronenstrahlung aus Lithium gewonnen, wobei zusätzlich Helium entsteht. Der Energiegehalt der bekannten Erzvorkommen in der Erdkruste reicht theoretisch aus, um den weltweiten Strombedarf auf dem Niveau des Jahres 1995 für 3 000 Jahre zu decken, derjenige des Lithiumgehalts im Seewasser für 60 Mio. Jahre (Ongena/van Oost 2000). Lithium wird allerdings auch in anderen Bereichen als Ressource genutzt (Tran 18. April 2001, Expertengespräch), z. B. zur Herstellung von Batterien, Katalysatoren, Keramiken oder auch Medikamenten, sodass bei ausschließlicher Verwendung von Lithium aus Erzvorkommen möglicherweise Nutzungskonflikte auftreten könnten.

Die Zulieferung von Tritium aus externen Quellen wird beim erstmaligen Anfahren einer Fusionsanlage sowie – aufgrund der kurzen Halbwertszeit des im Brutmantel erzeugten Tritiums – voraussichtlich nach längeren Stillstandszeiten eines Fusionskraftwerks notwendig sein. Im Reaktorbetrieb wird das benötigte Tritium im Fusionsreaktor erbrütet und in einer Aufarbeitungsanlage vor Ort aus den Brutelementen extrahiert. Für Fusionsexperimente wie ITER steht Tritium vorerst in ausreichenden Mengen zur Verfügung, z. B. als Abfallprodukt aus kanadischen Spaltreaktoren vom Typ CANDU (Bradshaw 2001).

Die Umweltbelastungen, die durch den Abbau von Lithiumvorkommen in der Erdkruste bzw. durch die Nutzung von Meerwasser zur Brennstoffgewinnung entstehen, werden als gering eingestuft (Bradshaw 2001). Die Anreicherung von $^{6}$Li aus natürlichem Lithium gilt als wenig aufwendig und ist bereits industriell erprobt (Weisse et al. 2000).

Da die Fusionsenergie im Brennstoff in hoher Dichte gespeichert ist, sind kaum Transporte erforderlich (Bradshaw 2001). Die Mengen an Deuterium und Lithium, die jährlich für ein 1 000-$MW_e$-Fusionskraftwerk benötigt würden, könnten in einem einzigen Lastwagen angeliefert werden und werden auf etwa 0,6 (Hogan/Bertel 1995) bis 3 t (Bruhns 2000) geschätzt. Dabei werden keine radioaktiven Substanzen transportiert.

Unter den alternativen Brennstoffkonzepten ist nur die D/$^{3}$He-Fusion mit wesentlichen Ressourcenproblemen verbunden. Hier müsste das auf der Erde sehr seltene $^{3}$He durch Erschließung der Vorkommen auf dem Mond beschafft werden (Bradshaw 2001).

### 2.2 Anlage

Gegenwärtig werden verschiedene Anlagendesigns diskutiert, die eine Fusionsanlage charakterisieren, nicht aber schon deren Eigenschaften im Detail beschreiben. Einige Untersuchungen geben erste Hinweise zum Ressourcenverbrauch eines Fusionskraftwerks über den gesamten Lebenszyklus, d. h. Bau, Betrieb und Stilllegung.

Die Gesamtmasse, die in einem Fusionskraftwerk verbaut wird, ist etwa doppelt so hoch wie in einem anderen Kraftwerk vergleichbarer Leistung. Dabei kommen überwiegend konventionelle Materialien zum Einsatz wie Stahl, evtl. Vanadiumlegierungen, Kupfer, Keramik und Beton. In geringeren Mengen werden auch seltenere Substanzen wie Beryllium, Blei, Niob und Titan verwendet. Engpässe bei den zum Bau und Betrieb eines Fusionskraftwerks benötigten Ressourcen werden von Experten aus der Community der Fusionsforschenden nicht erwartet, auch wenn Fusionsenergie intensiv über Jahrhunderte hinweg genutzt werden sollte (Raeder et al. 1995). Dabei wird in der Regel von einem weit gehenden Recycling, insbesondere der eher seltenen Materialien, die in einer Fusionsanlage verwendet werden, ausgegangen.

Eine erste Lebenszyklusanalyse wurde für die Materialien, die in eine Fusionsanlage mit 1 000 MW elektrischer Leistung eingesetzt werden, erstellt. Für den Anlagenkern wurde angenommen, dass Stahl als Strukturmaterial dominiert (Schleisner 1998). Die Autorin der Studie kam zu dem Ergebnis, dass die für den Bau eines Fusionskraftwerks aufgewendete Energie in etwa sechs Monaten Kraftwerksbetrieb wieder eingespielt wäre (Energie-Rücklaufzeit). Die über den gesamten Lebenszyklus freigesetzten indirekten Emissionen von Luftschadstoffen wie Kohlendioxid, Schwefeldioxid und Stickoxiden liegen beim Doppelten eines heutigen Spaltkraftwerks, was vor allem auf die größere Masse an Beton in einer Fusionsanlage zurückgeht. Der Materialeinsatz (Beton, Stahl, etc.) für Windkraftanlagen führt zu indirekten Emissionen, die etwa dreimal so groß sind wie bei der Fusion[20] (Bradshaw 2001; Schleisner 1998).

## 3. Weitere Umweltauswirkungen

Von den weiteren Umweltauswirkungen werden im Folgenden nur die Emissionen von Schadstoffen und Treibhausgasen und die Entsorgung von (nicht radioaktiven) Abfällen näher beleuchtet. Andere Umweltauswirkungen,

[20] Die Resultate hängen wesentlich vom eingesetzten Energiemix und den getroffenen Maßnahmen zur Emissionsminderung ab.

wie z. B. die Emission von Wärme und Lärm oder der Landverbrauch, bewegen sich in einem Bereich, wie er auch von anderen Großkraftwerken bekannt ist.

### 3.1 Emissionen von Schadstoffen

Verschiedene Anlagenkonzepte sehen chemisch toxische Substanzen wie Blei oder Beryllium, Vanadium, Lithium und Chrom vor. Diese Substanzen liegen in der Regel weder in flüchtiger Form vor, noch kommen sie mit Wasser in Kontakt, sodass die Emissionen in die Umgebung im Normalbetrieb voraussichtlich geringfügig bleiben. Maßnahmen zum Schutz vor radiologischen Emissionen stellen im Allgemeinen auch einen wirksamen Schutz gegen chemisch toxische Emissionen dar (Piet et al. 1995). Das chemotoxikologische Risiko für Arbeitnehmer bedarf noch genauerer Untersuchungen.

### 3.2 Entsorgung nicht radioaktiver Abfälle aus Fusionsanlagen

In Fusionsanlagen werden sowohl konventionelle Abfälle und Abwässer als voraussichtlich auch Abfälle und Abwässer, die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung als Sonderabfälle zu klassifizieren sind, anfallen. Der Anteil der Sonderabfälle variiert ebenso wie der Anteil der radioaktiven Abfälle mit dem Anlagendesign. Genauere Angaben zu Mengen und Zusammensetzung sind bisher nicht verfügbar.

### 3.3 Entsorgung von Abfällen mithilfe von Fusionsanlagen

Der Neutronenfluss in Fusionskraftwerken kann potenziell zur Behandlung und Unschädlichmachung langlebiger radioaktiver Abfälle und chemischer Sonderabfälle (Sheffield et al. 2000) genutzt werden. Bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle ist vor allem die Umwandlung langlebiger Radionuklide – aus Spaltreaktoren bzw. der Anwendung in Medizin, Industrie und Forschung – in Nuklide mit kürzeren Halbwertszeiten oder nicht radioaktive Produkte von Interesse. Dabei soll versucht werden, die Notwendigkeit einer Isotopentrennung, die aufwendig und mit Risiken für Arbeitnehmer und Umwelt verbunden ist, zu umgehen.

## VIII. Ist Kernfusion sozial nachhaltig?

Im Sinn einer nachhaltigen Entwicklung entscheidet die Sozialverträglichkeit neben der Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit darüber, ob Kernfusion als Option gefördert werden sollte oder nicht (Korff 1992). Da viele der damit verbundenen Fragen bereits in den vorangehenden Kapiteln behandelt wurden, konzentriert sich das folgenden Kapitel vor allem auf die Verteilung von Handlungsspielraum und Ressourcen zwischen den verschiedenen Optionen. Ganz allgemein bedeutet Nachhaltige Entwicklung, eine möglichst hohe Flexibilität für zukünftiges Handeln zu ermöglichen.

Ein einmal errichtetes Fusionskraftwerk bindet Kapital und Ressourcen für viele Jahrzehnte und bedeutet damit eine Festlegung auf diese Technologie für eine lange Zeit. Vor diesem Hintergrund muss die Bewertung, ob Kernfusion als nachhaltig zu beurteilen ist, sehr sorgfältig vorgenommen werden. Diese Bewertung sollte im Rahmen eines breiten gesellschaftlichen Dialoges erfolgen.

### 1. Gerechtigkeit zwischen Generationen

Die Erschließung der Fusionsenergie folgt dem Bestreben, die Energieversorgung der Zukunft zu sichern. Kernfusion eröffnet die Möglichkeit, von praktisch unbegrenzt und universell verfügbaren Energieträgern zu profitieren und die Belastung der Atmosphäre mit klimaschädigenden Emissionen langfristig wirksam zu vermindern. Nach dem Vorsorgeprinzip kann die Fusionsforschung somit als Absicherung gegenüber zwei wesentlichen unerwünschten Entwicklungen der Zukunft verstanden werden, der Energieknappheit und der Klimaveränderung.

Andererseits erzeugen einige Versuchsanlagen zur Kernfusion und Fusionskraftwerke radioaktive Abfälle. Deren sichere Entsorgung muss über Jahrzehnte bis möglicherweise Hunderttausende von Jahren sichergestellt werden und schränkt damit die Handlungsfreiheit künftiger Generationen ein. Der ethischen Forderung nach Entwicklung von Systemen mit möglichst geringer Eingriffstiefe, wie sie z. B. Energiesparmaßnahmen darstellen (Hubig 1999), werden Fusionskraftwerke daher nicht gerecht.

### 2. Verteilung von Ressourcen zwischen Optionen

Auch wenn das Ziel breiter Handlungsspielräume für kommende Generationen unbestritten ist, können aufgrund der nur begrenzt zur Verfügung stehenden Mittel nicht alle Optionen auf hohem Niveau gefördert, sondern müssen Schwerpunkte gesetzt werden. Verteilungsfragen stellen sich vor allem zwischen Kernfusion und erneuerbaren Energien. Nach Ansicht von Kritikern der Fusionsforschung sollten die staatlichen Mittel, die im Bereich der Kernfusion bereit gestellt werden, besser in die Entwicklung erneuerbarer Energien investiert werden. Dafür spricht, dass

– die Nutzbarkeit erneuerbarer Energien bereits bewiesen ist;

– sich die technischen Optionen im Bereich erneuerbarer Energien besser stufenweise und bedarfsgerecht aufbauen lassen, nicht zuletzt auch, weil eine Vielzahl erneuerbarer Energiesysteme zur Verfügung steht;

– erneuerbare Energien bereits heute und in Zukunft verstärkt zur dringenden Lösung der Klimaproblematik beitragen können.

Dagegen spricht, dass eine breite Vielfalt unterschiedlicher Optionen zur Energieerzeugung, die auch die Kernfusion umfassen kann, wünschenswert ist, um

– künftigen Entwicklungen möglichst flexibel zu begegnen, z. B. Vorsorge zu treffen, falls der globale Energiebedarf trotz einer international auf Energieeffizienz ausgerichteten Politik stärker als erwartet anwachsen sollte;

– Verfügbarkeitsrisiken und politische Abhängigkeiten zu vermeiden, z. B. beim Import von Elektrizität aus solarthermischen Kraftwerken in Regionen mit einem hohen Anteil direkter Sonneneinstrahlung;
– die Energieversorgung wirtschaftlich und ökologisch zu optimieren, z. B. indem Ballungsgebiete primär durch große zentrale Anlagen, weniger besiedelte Regionen durch kleine dezentrale Anlagen mit Energie versorgt werden.

Die Frage der Verteilung von Ressourcen zur Förderung verschiedener Energieträger spiegelt sich auch innerhalb der Kernfusionsforschung wider, wo die derzeitige Konzentration auf wenige Forschungsrichtungen die Chancen auf zügige Nutzbarmachung der Fusionsenergie erhöht, aber auch zu einer Einengung der Entwicklungspotenziale für die Zukunft führt und im ungünstigsten Fall in eine Sackgasse führen kann.

## 3. Gerechtigkeit zwischen Regionen

Kritiker halten der Fusionsforschung und der künftigen Nutzung von Fusionsenergie entgegen, dass sie auf die technologischen Möglichkeiten, die Infrastruktur und die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen hoch entwickelter industrialisierter Länder zugeschnitten seien. Die erheblichen Investitionen, die ein Fusionskraftwerk erfordert, seien in weniger entwickelten Ländern kaum aufzubringen. Kernfusion sei zudem offensichtlich nicht auf die spezifischen Bedürfnisse und Möglichkeiten dünn besiedelter Länder oder von Regionen mit verhältnismäßig hoher und konstanter Sonneneinstrahlung zugeschnitten.

Dagegen wird eingewendet, dass es in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich kaum noch weniger entwickelte Länder geben werde (Vetter 2001). Einige bedeutende außereuropäische Nationen wie China und Indien bauten derzeit die Nutzung von Steinkohle zur Energiegewinnung aus. Fusionskraftwerke würden sich gut in die künftigen Versorgungsinfrastrukturen dieser Länder einpassen und würden dabei zur Verminderung klimaschädigender Emissionen beitragen (Bradshaw et al. 15. Juni 2001, Expertengespräch). Andere Experten betonen, dass Kernfusion einen Beitrag der entwickelten Nationen zur globalen Energieversorgung der Zukunft darstelle. Wenn der weitere technische Fortschritt beispielsweise Korea, China und Indien überlassen werde, ginge damit ein Glaubwürdigkeitsverlust der Industrieländer einher. Diese Länder seien aufgrund ihrer guten wirtschaftlichen und technisch-wissenschaftlichen Ausgangslage besonders gefordert, einen Beitrag zur Lösung des Weltenergieproblems zu leisten (Samm 2001).

## 4. Vermeidung von Konflikten

Durch Erschließung einer praktisch unerschöpflichen Energiequelle und die universelle Verfügbarkeit ihrer Brennstoffe ist Kernfusion geeignet, Konflikte um Ressourcen zu vermeiden. Zudem trägt die ausgeprägte grenzüberschreitende Kooperation bei der Fusionsforschung zur internationalen Verständigung bei. Ob die zur Errichtung und Inbetriebnahme von Fusionskraftwerken erforderlichen Kenntnisse und Ressourcen ebenso universell verfügbar sein werden wie die Brennstoffe, ist allerdings fraglich.

Energiegewinnung durch Kernfusion ist mit einem, wenn auch begrenzten, Proliferationsrisiko verbunden, und die Entwicklung der Trägheitsfusion weist Synergien mit militärischen Anwendungen auf.

Konfliktpotenziale birgt auch mangelnde Zustimmung in der Bevölkerung. Die Energiegewinnung durch Kernfusion wird nur dann Akzeptanz erlangen, wenn sie den Bedürfnissen und Anliegen der Gesellschaft entspricht. Wesentliche Entscheidungen sollten im Dialog mit der Gesellschaft und in einem demokratischen Prozess gefällt werden, der es auch den unterlegenen Kreisen erlaubt, dessen Ergebnisse mitzutragen.

## 5. Akzeptanz

Akzeptanz wird stark von gesellschaftlichen Rahmenbedingungen bestimmt. Eine Prognose der künftigen Akzeptanz, insbesondere im Jahr 2050, wenn die ersten kommerziellen Fusionskraftwerke ans Netz gehen könnten, ist heute nicht möglich. Hierfür wäre beispielsweise die Beantwortung der Frage erforderlich, ob unsere Gesellschaft in 50 Jahren eher individualistisch, egalitär oder hierarchisch geprägt sein wird. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf die Wahrnehmung und Akzeptanz der Fusionstechnologie in der Gesellschaft (Thompson 1991). Eine Reihe begünstigender bzw. hemmender Faktoren werden im Folgenden identifiziert.

Für eine gute öffentliche Akzeptanz der Fusionsenergie sprechen aus der Sicht der Fusionsforschenden vor allem die geringen Emissionen an Treibhausgasen und das geringe Risiko von Unfällen mit schwerwiegenden Folgen auf die Umgebung. Kernfusion eröffne die Perspektive, weltweit ein hohes Niveau an Lebensqualität zu erreichen, ohne dass Verteilungsprobleme bezüglich Energie oder inakzeptable Umweltveränderungen zu befürchten wären (Bradshaw 2001).

Kritiker halten dagegen, Großprojekte lösten generell in der Öffentlichkeit Skepsis aus. Fusionskraftwerke, die ein wesentliches radioaktives Inventar enthielten und Endlager für radioaktive Abfälle erforderlich machten, könnten nicht mit öffentlicher Zustimmung rechnen.

In vielen Industrienationen trifft Kernspaltung derzeit auf geringe Akzeptanz, während die Einstellung zur Kernfusion noch offen ist. Daraus ergibt sich eine vergleichsweise günstige Ausgangslage für Fusionskraftwerke. Würde sich die öffentliche Akzeptanz zugunsten der Kernspaltung wenden, stellten neuere Konzepte für Spaltkraftwerke, die ähnliche Sicherheitsanforderungen wie Fusionsanlagen erfüllen, aber stärker auf bereits erprobte Grundlagen zurückgreifen können, möglicherweise eine Konkurrenz für Fusionskraftwerke dar.

Kernfusion ist derzeit kein wichtiges Thema in der Öffentlichkeit, das Vorwissen der breiten Bevölkerung

gering (Hörning et al. 1999). Alle Fusionsforschungseinrichtungen in Deutschland betreiben eine intensive Öffentlichkeitsarbeit. Auf EU-Ebene sind Initiativen zur Information der Öffentlichkeit in Vorbereitung, bei denen insbesondere das Internet als Medium genutzt werden soll (Vetter 2001).

Jedoch haben reine Informations- oder Werbemaßnahmen in der Vergangenheit für Zwecke der Akzeptanzbeschaffung im Wesentlichen versagt. Zur Vermeidung von Akzeptanz- und Vertrauenskrisen ist ein frühzeitiger intensiver und ergebnisoffener Dialog zwischen Wissenschaft, Interessengruppen und der Öffentlichkeit erforderlich.

## IX. Was tun?

Trotz der Wissensdefizite und der Bewertungsprobleme, die in den vorangegangenen Kapiteln ausführlich diskutiert wurden, besteht kein Grund, die Entwicklung der Fusionsenergie sich selbst zu überlassen. Zwar ist in vielen Fragen heute nicht verlässlich zu beurteilen, ob und inwieweit die Fusionsenergie den vielen Facetten des Nachhaltigkeitspostulates entspricht. Es ist aber möglich, bereits gegenwärtig entsprechende Anforderungen zu formulieren und die Bedingungen zu erkennen, unter denen Fusionsentwicklung diesen Postulaten entsprechen kann. Dann wiederum kann über Gestaltungspotenziale der Fusion aus gesellschaftlicher Sicht nachgedacht werden: Durch welche steuernden Eingriffe kann die Entwicklung so beeinflusst werden, dass diese Bedingungen realisiert werden? Es sind aus dieser Sicht folgende generelle Handlungsoptionen der Forschungspolitik möglich:

– Option „Kontinuierliche Fortsetzung“

– Option „Gründliche Evaluation“

– Option „Neuausrichtung“

Der Sinn der Optionen ist es, den gesamten Möglichkeitsraum für politische Gestaltung aufzuspannen. Die konkrete Positionierung in diesem Möglichkeitsraum ist der politischen Bewertung und Entscheidung vorbehalten. Die Optionen werden im Folgenden akzentuiert dargestellt. Dennoch sind sie nicht als streng voneinander abgegrenzt zu sehen, vielmehr sind Mischformen dieser Grundoptionen denkbar.

### 1. Option „Kontinuierliche Fortsetzung“

Die Option „Kontinuierliche Fortsetzung“ bedeutet weitere intensive Forschungsaktivitäten mit den bestehenden, im Wesentlichen den Vorstellungen der Fusionsforschungs-Community folgenden Schwerpunkten. Diese Option würde der Eigendynamik des Forschungsfeldes folgen und die forschungspolitische Strategie der Vergangenheit konsequent fortsetzen.

Mit der Fortführung der bewährten Forschungspolitik werden die herausragenden wissenschaftlichen Erfolge der vergangenen Jahre bei der Erforschung der Grundlagen der Kernfusion anerkannt. Eine optimistische Haltung, was die Prognosen zum Realisierungshorizont der Stromerzeugung durch Kernfusion anbelangt, würde eine Entscheidung für die Option „Kontinuierliche Fortsetzung“ befördern. Jedoch wäre diese Strategie auch bei einer weniger optimistischen Einschätzung zu rechtfertigen, wenn man die positiven Aspekte der Kernfusionsforschung, insbesondere die Bedeutung als wissenschaftskulturelle Leistung und den Beitrag zur internationalen Verständigung, hoch bewertet. Hier steht die Fusionsforschung allerdings in Konkurrenz zu anderen ähnlich gelagerten Forschungsvorhaben, wie der Internationalen Raumstation ISS und der Elementarteilchenforschung.

Die Verfolgung der Option „Kontinuierliche Fortsetzung“ würde eine klare Entscheidung für das Projekt ITER bedeuten. Eine aktive Rolle bei der Standortfindung und ein deutliches Engagement für eine adäquate und langfristig verlässliche Finanzausstattung der reaktororientierten Fusionsforschung im 6. Rahmenprogramm und darüber hinaus wären dann angezeigt.

Eine wichtige Determinante für den Erfolg dieser Strategie ist die Schaffung eines breiten Konsenses über die Sinnhaftigkeit von neuen zu finanzierenden Projekten und eine solide Unterstützung im gesamten politischen Raum. Dies ist von großer Bedeutung, da in unserem politischen System die Festlegung finanzieller Ressourcen für Jahrzehnte andauernde Unternehmungen nicht ohne weiteres möglich ist.

### 2. Option „Gründliche Evaluation“

Die Option „Gründliche Evaluation“ bedeutet eine umfassende Evaluation des Themenfeldes Kernfusion unter Einbeziehung von externem Sachverstand mit Kriterien nachhaltiger Energieversorgung als Leitlinie. Im Ergebnis würde die Eigendynamik möglicherweise aufgebrochen.

Diese Strategie folgt der Erkenntnis, dass die bisher angewandte sequentielle Methode, als erstes die wissenschaftliche Machbarkeit zu beweisen, dann die technologische Realisierbarkeit zu zeigen und erst als letzten Schritt die sozio-ökonomische Machbarkeit zu untersuchen, im Sinne einer nachhaltigen Energieversorgung der Zukunft nicht zielführend ist. Vielmehr sollten aus dem Leitbild der nachhaltigen Energieversorgung abzuleitende Gestaltungsanforderungen an die Fusionstechnologie bei den zu treffenden Technologieentscheidungen integrale Berücksichtigung finden. Hierzu gehört in der Konsequenz auch die Formulierung von Umsteuerungs- oder Abbruchkriterien, falls es bei dem Phänomen des „Moving Target“ bleiben sollte. Dies ist von Bedeutung, da bei einem kontinuierlich hohen Einsatz von Forschungsmitteln für Fusionsgroßprojekte sowohl Expertise als auch Infrastrukturen aufgebaut werden, die eine Eigendynamik entwickeln können, die ein späteres Umsteuern behindern oder sogar unmöglich machen könnten.

Für ITER hätte das zur Konsequenz, dass Entscheidungen über eine weitere Beteiligung am Projekt für die Dauer der Evaluation zurückgestellt werden müssten.

Falls die Evaluation positiv ausfällt, sollte die Realisierung von ITER nicht mehr verschleppt werden. Sinnvoll wäre es jedoch, ein kontinuierliches Monitoring zu etablieren, das über die Einhaltung der Umsteuerungs- bzw.

Abbruchkriterien wacht. Falls sie negativ ausfällt, sind Maßnahmen für eine Neuausrichtung der Fusionsforschung zu ergreifen.

### 3. Option „Neuausrichtung“

Die Option „Neuausrichtung“ bedeutet, die primäre Ausrichtung auf die schnellstmögliche Entwicklung der Kernfusion als Energietechnologie auf dem TOKAMAK-Pfad aktiv zu beenden und auf ein Forschungsprogramm mit dem Fokus eines breiter angelegten Verständnisses der wissenschaftlichen Grundlagen und alternativer Einschlusskonzepte zurückzuführen. Hiermit würde ein Abbruch der Eigendynamik des Forschungsbereiches forciert.

Diese Strategie beruht auf dem Grundgedanken, dass es vernünftig ist, Investitionsentscheidungen in Großprojekte so lange zurückzuhalten, bis eine wissenschaftlich abgesicherte Auswahl des langfristig für eine Reaktorentwicklung erfolgversprechendsten Konzeptes möglich ist. Um die hierfür notwendigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu gewinnen, ist eine Nutzung bestehender Forschungsanlagen und die parallele Förderung einer ganzen Anzahl kleinerer neuer Anlagen zur Initiierung eines gezielten Suchprozesses zum Test der unterschiedlichen Einschlusskonzepte erforderlich.

Dies bedeutet eine erhebliche Restrukturierung der Fusionsforschung, ähnlich wie sie z. B. Mitte der 90er-Jahre in den USA vor dem Hintergrund von Budgetrestriktionen vorgenommen wurde (Department of Energy 1999). Hier zeigte sich jedoch, dass die Aufrechterhaltung eines starken und ausbalancierten Fusionsforschungsprogramms unter einschneidenden Budgetrestriktionen eine schwer zu bewältigende Managementaufgabe ist. Es besteht das Risiko, dass wertvolle Expertise verloren geht, die vielleicht später wieder mühsam aufgebaut werden muss.

Die Verfolgung der Strategie-Option „Neuausrichtung“ wäre eine klare Entscheidung gegen ITER. Hierdurch frei werdende Mittel könnten gegebenenfalls in andere Bereiche der Energieforschung umgeschichtet werden.

Eine offene Frage ist allerdings, wie eine solche Restrukturierungsstrategie angesichts der vielfältigen internationalen Verflechtungen in der Fusionsforschung umgesetzt werden kann, ohne die Zuverlässigkeit Deutschlands als Partner in internationalen Kooperationsprojekten infrage zu stellen.

Zentrale Herausforderung – gleichgültig welche konkrete Forschungsstrategie verfolgt werden soll – bleibt, unabhängigen Sachverstand aufzubauen und einen breiten gesellschaftlichen Diskurs zu organisieren. Letzteres ist, angesichts der Schwierigkeit, dass eine direkte Betroffenheit in der Gesellschaft aufgrund der zeitlichen Ferne und der Lebensweltferne der Fusion kaum festzustellen ist, keine einfache Aufgabe.

## Literatur

### 1. In Auftrag gegebenes Gutachten

Basler & Hofmann AG (2001): Kernfusion 2001. Gutachten im Auftrag des Deutschen Bundestages (Autoren: Eckhardt, A., Meyer, P.), Zürich

### 2. Weitere Literatur

BMBF (2002): Faktenbericht Forschung 2002, Bonn

BOSCH, H.-ST., BRADSHAW, A. (2001): Kernfusion als Energiequelle der Zukunft. In: Physikalische Blätter 57(11), S. 55–60

BRADSHAW, A. M. (2001): Antworten zur parlamentarischen Anhörung Kernfusion am 28. März 2001, mit Beiträgen von H. W. Bartels, H.-S. Bosch, H. Bolt, D. Campbell, W. Dyckhoff, T. Hamacher, M. Kaufmann, K. Lackner, D. Maisonnier, I. Milch, M. Pick, J. Raeder, R. Wilhelm. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A-Drs. 14-383d, Berlin

BRUHNS, H. (2000): Une Fourgonnette pour approvisionner la Suisse. In: Benz, A. et al.: Plasmas – Des Etoiles au quotidien. Fusion – Energie du 21ème Siècle. Centre des Recherches en Physique des Plasmas, Lausanne

COLE, J. (1999): Global 2050 – A basis for speculation, Nottingham

DELENE, J. G., SHEFFIELD, J., WILLIAMS, K. A., REID, R. L., HADLEY, S. (1999): An Assessment of the Economics of Future Electric Power Generation Options and the Implications for Fusion. National Technical Informations Service, Springfield (http://www.ornl.gov/, Stand: 5. März 2001)

DEUTSCHER BUNDESTAG (2001): Kurzprotokoll der Öffentlichen Anhörung zur Kernfusion am 28. März 2001. Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, Protokoll 14/43, Berlin

DOE (Department of Energy, Secretary of Energy Advisory Board) (1999): Realizing the Promise of Fusion Energy. Final Report of the Task Force on Fusion Energy, Washington D. C.

EDWARDS, R. (2000): The Heat is on. In: New Scientist 169(2260), 14. Oktober, S. 4

ENQUETE-KOMMISSION („Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des 14. Deutschen Bundestages) (2001): Erster Bericht. Deutscher Bundestag, Drucksache 14/7509, 14. November 2001, Berlin

ENQUETE-KOMMISSION („Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages) (1998): Konzept Nachhaltigkeit: Vom Leitbild zur Umsetzung. Abschlussbericht. Deutscher Bundestag, Drucksache 13/11200, 26. Juni 1998, Bonn

EU (Europäische Union) (2001): Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen im Elektrizitätsbinnenmarkt. In: Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 283/33–40

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2001): Vorschläge für Entscheidungen des Rates über die spezifischen Programme zur Durchführung des Rahmenprogramms 2002 bis 2006 der Europäischen Atomgemeinschaft im Bereich der Forschung und Ausbildung, KOM(2001) 279 endg., Brüssel

EUROPÄISCHE KOMMISSION (2002): KOM(2002) 43 endg.

EUROPÄISCHES PARLAMENT (1999): Emerging Nuclear Energy Systems, their Possible Safety and Proliferation Risks. Working Paper Energy and Research Series ENER 111 EN, Brussels

FISCHEDICK, M., LANGNISS, O., NITSCH, J. (2000): Nach dem Ausstieg: Zukunftskurs Erneuerbare Energien, Stuttgart

GDCH (Gesellschaft Deutscher Chemiker, Fachgruppe Nuklearchemie) (2001): Anlagen zum Positionspapier der Fachgruppe Nuklearchemie in der Gesellschaft Deutscher Chemiker – Arbeitsschwerpunkte der nuklearchemischen Forschung und Anwendung. Frankfurt a. M. (http://www.gdch.de/fachgrup/nuklear/posi2.pdf, Stand: 19. April 2001)

HEINDLER, M. (2001): Antworten zur parlamentarischen Anhörung Kernfusion am 28. März 2001, Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A-Drs. 14-383h und 14-383h neu, Berlin

HEINLOTH, K. (1997): Die Energiefrage, Braunschweig, Wiesbaden

HENNICKE, P. (2001): Zukünftige Rolle der Kernfusion bei der Energieversorgung. In: Deutscher Bundestag 2001

HOGAN, W. J., BERTEL, E. (1995): Inertial Fusion Energy Fundamentals. In: Hogan, W. J. (Ed.): Energy from Inertial Fusion. IAEA, Wien

HOLDREN, J. P. (1995): Fusion Review Panel Report, by the President’s Committee of Advisors on Science and Technology (PCAST)

HÖRNING, G., KECK, G., LATTEWITZ, F. (1999): Fusionsenergie – eine akzeptable Energiequelle der Zukunft? Eine sozialwissenschaftliche Untersuchung anhand von Fokusgruppen. Arbeitsbericht Nr. 145 der Akademie für Technikfolgenabschätzung in Baden-Württemberg, Stuttgart

HUBIG, CH. (1999): Entwurf eines Systems von Regeln der Güterabwägung für Energieversorgungssysteme. In: Nennen, H. U., Hörning, G. (Hg.): Energie und Ethik – Leitbilder im philosophischen Diskurs, Franfurt a. M.

IEA (International Energy Agency) (2000): World Energy Outlook, Paris

IPP (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik) (1995): Kernfusion – Berichte aus der Forschung. Garching, Greifswald

IWR (Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien) (2001): Infotag EU-Forschungsförderung im Bereich erneuerbare Energien. (http://www.uni-muenster.de/Energie/iwr/01/01/0902.html, Stand: 7. Mai 2001)

JÖRISSEN, J., KOPFMÜLLER, J., BRANDL, V., PAETAU, M. (1999): Ein integratives Konzept nachhaltiger Entwicklung. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6393, Karlsruhe

KING, D., AIRAGHI, A., BOLT, H., CALVO, J., PROIS, B., GAUBE, M., HOGBERG, L., MARBACH, G., WALSGROVE, S. (2001): Conclusions of the Fusion Fast Track Experts Meeting held on 27 November 2001 on the initiative of Mr. De Donnea, President of the Research Council, Brussels (http://fire.pppl.gov/eu_fast_track_101201.pdf, Stand: 1. März 2002)

KOPFMÜLLER, J., BRANDL, V., JÖRISSEN, J., PAETAU, M., BANSE, G., COENEN, R., GRUNWALD, A. (2001): Nachhaltigkeit integrativ betrachtet – Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren, Berlin

KORFF, W. (1992): Die Energiefrage. Entdeckung ihrer ethischen Dimension, Trier

LAKO, P. (Ed.) (1999): Long-Term Scenarios and the Role of Fusion Power. Netherlands Energy Research Foundation, ECN-C-98-095, Petten

LANGNISS, O., LUTHER, J., NITSCH, J. (1997): Strategien für eine nachhaltige Energieversorgung – Ein solares Langfristszenario für Deutschland, Stuttgart, Freiburg

LEDERER, B. J., WILDBERG, D. W. (1992): Reaktorhandbuch, München

LEHMANN, H. (2001): Antworten zur parlamentarischen Anhörung Kernfusion am 28. März 2001. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A-Drs. 14-383j, Berlin

LIEBERT, W. (1997): Aussichten nuklearer Energieversorgung für die Zukunft. In: Bender, W. (Hg.): Verantwortbare Energieversorgung für die Zukunft. TUD Schriftenreihe Wissenschaft und Technik, Darmstadt

LIEBERT, W. (2001): Erste Antworten zur Fragenliste zur parlamentarischen Anhörung Kernfusion am 28. März 2001. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A-Drs. 14-383f, Berlin

LIEBERT, W., GLASER, A., PISTNER, CHR. (1999): Fortgeschrittene Nuklearsysteme. Review Study, Schweizerischer Wissenschafts- und Technologierat, Bericht TA 34/1999, Bern

LOVINS, A., HENNICKE, P. (1999): Voller Energie. Vision: Die globale Faktor Vier-Strategie für Klimaschutz und Atomausstieg, Frankfurt a. M., New York

LTI (The LTI-Research Group) (Ed.) (1998): Long-Term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System, Mannheim

NAJMABADI, F. (1999): Prospects for Attractive Fusion Power Systems. In: Phil. Trans. Royal Society 357, S. 625–638 (http://alisa.ucsd.edu/najmabadi/PAPER/)

NEW YORK TIMES (1954): 17. September

NITSCH, J. (1999): Entwicklungsperspektiven erneuerbarer Energien und ihre Bedeutung für die Energieversorgung von Entwicklungsländern. In: Märkte der Zukunft – Erneuerbare Energien für Entwicklungsländer. Tagungsband, Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 27. Januar 1999

NITSCH, J., FISCHEDICK, M., ALLNOCH, N., BAUMERT, M., LANGNISS, O., NAST, M., STAISS, F., STAUDE, U. (2000): Klimaschutz durch Nutzung erneuerbarer Energien. Studie im Auftrag des BMU und des UBA, Bonn, Berlin

NITSCH, J., RÖSCH, CH. (2001): Perspektiven für die Nutzung regenerativer Energien. In: Grunwald, A., Coenen, R., Nitsch, J., Sydow, A., Wiedemann, P. (Hg.): Forschungswerkstatt Nachhaltigkeit – Wege zur Diagnose und Therapie von Nachhaltigkeitsdefiziten, Berlin

ONGENA, J., VAN OOST, G. (2000): Energy for Future Centuries. Will Fusion be an Inexhaustible, Safe and Clean Energy Source? In: Transactions of Fusion Technology 37(2), S. 3–15 (http://europa.eu.int/comm.research/fusion1.html)

OTA (U. S. Congress, Office of Technology Assessment) (1987): Starpower – The U. S. and the International Quest for Fusion Energy. OTA-E-338, U. S. Government Printing Office, Washington D. C.

OTA (U. S. Congress, Office of Technology Assessment) (1995): The Fusion Energy Program: The Role of TPX and Alternate Concepts. OTA-BP-ETI-141, U. S. Government Printing Office, Washington D. C.

PAMÉLA, J., SOLANO, E. R. (2001): From JET to ITER: Preparing the next step in fusion research. For publication in: Physicalia Magazine, Journal of the Belgian Physical Society (http://www.jet.efda.org, Stand: 14. September 2001)

PELLAT, R. (1999): 1999 Fusion JAERI Seminar. (http://fire.pppl.gov)

PETERSON, F. (1998): The Economics oft Inertial Fusion Energy, updated 23. September 1998. (http://www.nuc.berkeley.edu/thyd/icf/economics.html, Stand: 5. März 2001)

PIET, S. J. et al. (1995): Safety and Environmental Impact. In: Hogan, W. J. (Ed.): Energy from Inertial Fusion. IAEA, Wien

PROGNOS/EWI (1999): Die längerfristige Entwicklung der Energiemärkte im Zeichen von Wettbewerb und Umwelt. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Berlin

RAEDER, J., COOK, I., MORGENSTERN, F., SALPIETRO, E., BÜNDE, R., EDGAR, E. (1995): Safety and Environmental Assessment of Fusion Power (SEAFP). Report of the SEAFP Project, European Commission, EURFUBRU XII-217/95, Brussels

ROWBERG, R. E. (2000): Congress and the Fusion Energy Sciences Program: A Historical Analysis. Congressional Research Service/The Library of Congress, Order Code RL30417

SAMM, U. (2001): Antworten zur parlamentarischen Anhörung Kernfusion am 28. März 2001. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A-Drs. 14-383c, Berlin

SCHAPER, A., SCHMIDT, G., BÄHR, R. (1999): Emerging Nuclear Energy Systems, their Possible Safety and Proliferation Risks. European Parliament, Directorate General for Research, Energy and Research Series, Luxemburg

SCHLEISNER, L. (1997): Socio-Economic Research on Fusion. SERF: 1997–98, Macro-Task E2: External Costs and Benefits. Sub-Task: Life Cycle Assessment of a Fusion Power Plant, Report R2.1, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark

SCHLEISNER, L., KORHONEN, R. (1998): Socio-Economic Research on Fusion. SERF 1997-1998, Macro Task E2: External Costs and Benefits, Task 2: Comparison of External Costs, Report R2.2, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, VTT, Finland

SHEFFIELD, J., BROWN, W., GARRETT, G., HILLEY J., MCCLOUD, D., OGDEN, J., SHIELDS, TH., WAGANER, L. (2000): A Study of Options for the Deployment of Large Fusion Power Plants, Joint Institute for Energy and Environment, Knoxville, (http://www.jiee.org, Stand: 5. März 2001)

SHELL (1995): Energie im 21. Jahrhundert. Studie der Deutschen Shell AG Hamburg. In: Aktuelle Wirtschaftsanalysen 5(25)

TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2000): Elemente einer Strategie für eine nachhaltige Energieversorgung (Autoren: Fleischer, T., Grünwald, R., Oertel, D., Paschen, H.). TAB-Arbeitsbericht Nr. 69, Berlin

THOMPSON, M. (1991): A Note on the Cultural Theory Approach to Technology Assessment. In: Study on European Research into Controlled Nuclear Fusion Vol. 5 Annex 2. European Parliament, STOA, Luxemburg

VETTER, J. E. (2001): Stellungnahme zum Fragenkatalog zur Anhörung Kernfusion am 28. März 2001. Deutscher Bundestag, Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, A-Drs. 14-383a, Berlin

WEC/IIASA (Weltenergierat, Internationales Institut für angewandte Systemanalyse) (1998): Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond. World Energy Council Report, Luxemburg, London

WEISSE, J., MAGAUD, PH., MARBACH, G. (2000): Principes et Enjeux d'une Centrale à Fusion. In: Benz, A. et al.: Plasmas – Des Etoiles au quotidien. Fusion – Energie du 21ème Siècle. Centre des Recherches en Physique des Plasmas, Lausanne

## Anhang

### 1. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ziele von ITER und DEMO im Vergleich mit dem Stand der Technik in JET . . . . . . . . . . 10

Tabelle 2: Verteilung der Forschungsförderung auf magnetischen Einschluss und Trägheitseinschluss in der Europäischen Union und den USA, geschätzte und gerundete Werte . . . . . . . . . . 12

Tabelle 3: Ausgaben des Bundes für die Fusionsforschung . . . . . . . . . . 12

### 2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aktuelle Szenarien des Weltenergieverbrauchs für das Jahr 2050 . . . . . . . . . . 14

Abbildung 2: Shell-Szenario zur Entwicklung des Weltenergieverbrauchs bis zum Jahre 2060 . . . . . . . . . . 15

### 3. Parlamentarische Anhörung

Am 28. März 2001 fand eine Anhörung des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages zum Thema Kernfusion statt. Neben Mitgliedern des Ausschusses waren auch die parlamentarischen Mitglieder der Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ frageberechtigt. Der Verlauf der Anhörung wurde als Kurzprotokoll (Deutscher Bundestag 2001) festgehalten. Als Experten waren geladen:

– Prof. Dr. Alexander M. Bradshaw, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching
– Prof. Dr. Hardo Bruhns, EU-Kommission, Brüssel
– Dr. Anne Davies, Department of Energy, Washington D. C.
– Dr. James Decker, Department of Energy, Washington D. C.
– Prof. Dr. Manfred Heindler, TU Graz
– Prof. Dr. Peter Hennicke, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
– Dr. Wolfgang Liebert, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit IANUS, TU Darmstadt
– Harry Lehmann, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
– Prof. Dr. Manfred Popp, Forschungszentrum Karlsruhe
– Prof. Dr. Ulrich Samm, Forschungszentrum Jülich
– Dr. Jörg E. Vetter, Forschungszentrum Karlsruhe
– Dr. Joachim Ziesing, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin

Aussagen, die während der parlamentarischen Anhörung gemacht wurden, sind im Bericht mit dem Namen des Autors und dem Datum der Anhörung gekennzeichnet.

### 4. Expertengespräche

Basler & Hofmann hat im Rahmen des beauftragten Gutachtens eine Reihe von ergänzenden Expertengesprächen durchgeführt:

– Dr. G. Hörning, Zentrum für Technologiefolgen-Abschätzung beim Schweizerischen Wissenschafts- und Technologierat, am 29. März 2001
– Prof. Dr. M. Q. Tran, Centre de Recherche en Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, am 18. April 2001
– Prof. Dr. D. H. H. Hoffmann, Gesellschaft für Schwerionenforschung und Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, am 23. April 2001
– Dr. W. Liebert, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Naturwissenschaft, Technik und Sicherheit, Technische Universität Darmstadt, am 7. Juni 2001
– Prof. Dr. A. M. Bradshaw, Dr. H. W. Bartels, Dr. H.-S. Bosch, Dr. T. Hamacher, Prof. Dr. K. Lackner, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, am 15. Juni 2001

Aussagen, die an den Expertengesprächen gemacht wurden, sind im Bericht mit dem Namen des Autors und dem Datum des Gesprächs gekennzeichnet.

## Glossar

| | |
|---|---|
| **Break-even** | die durch Fusionsprozesse im Plasma freigesetzte Leistung ist gerade so groß wie die von außen zugeführte Heizleistung, d. h. Q=1 (siehe Q). |
| **Brutmantel** | das Plasmagefäß umgebender Teil eines Fusionskraftwerks, in dem (1) die Fusionsneutronen abgebremst werden, (2) die entstehende Wärme zum Primärkühlkreislauf geleitet wird und (3) mithilfe der beim Fusionsprozess frei werdenden Neutronen aus Lithium der Fusionsbrennstoff Tritium gewonnen wird. |
| **DEMO** | in der Nachfolge von ITER geplante Großversuchsanlage, die die technische Machbarkeit eines Fusionskraftwerks beweisen und erstmals elektrischen Strom im Dauerbetrieb erzeugen soll. |
| **Deuterium** | schweres Wasserstoffisotop $^2$H, das als Brennstoff für Fusionskraftwerke infrage kommt. |
| **Divertor** | Vorkehrung im Plasmagefäß zum Entfernen von Plasmaverunreinigungen und zur Wärmeabfuhr beim magnetischen Einschluss. |
| **Erste Wand** | innere Wand des Plasmagefäßes, in dem der Fusionsprozess stattfindet. |
| **IEA** | Internationale Energieagentur |
| **IFMIF** | International Fusion Materials Irradiation Facility. Hochintensive Neutronenquelle, um niedrig aktivierbare Materialien zu entwickeln und zu testen. Das Konzept einer solchen Anlage wurde in internationaler Kooperation ausgearbeitet und bei der IEA vorgelegt. |
| **Ignition** | die durch Fusionsprozesse freigesetzte Leistung reicht aus, um ohne äußere Heizung die Plasmatemperatur aufrecht zu erhalten. |
| **IIASA** | Internationales Institut für Angewandte Systemanalyse |
| **ITER** | als partnerschaftliches Unternehmen der Europäischen Union, Japans und Russlands geplante Großversuchsanlage zum magnetischen Einschluss, bei der ein Deuterium/Tritium-Plasma in stationärer Betriebsweise mit hoher Fusionsleistung aufrecht erhalten werden soll. |
| **Kernfusion** | Verschmelzung leichter zu schwereren Atomkernen. |
| **Lawson Parameter** | das Produkt aus Plasma-Dichte und Einschlusszeit, das zusammen mit der Plasma-Temperatur das Verhältnis zwischen Energieproduktion durch Fusion und von außen zugeführter Energie bestimmt. |
| **Plasma** | Materie, die zu einem erheblichen Teil aus ionisierten Atomen oder Molekülen und deren freien Elektronen besteht. |
| **Proliferation** | die Weitergabe von Materialien, Geräten und Kenntnissen, die es Dritten ermöglichen, in den Besitz von Kernwaffen zu gelangen. |
| **Q** | gibt das Verhältnis von Fusionsleistung zu der dem Plasma zugeführten Leistung an. |
| **SEAFP** | Projekt „Safety and Environmental Assessment of Fusion Power“ im 3. Rahmenprogramm der Europäischen Union, 1990 bis 1994. |
| **SERF** | 1997 initiiertes Projekt „Socio-Economic Research on Fusion“ der Europäischen Union. |
| **Stellarator** | ringförmig verdrillte Einschlussform des Plasmas, die mithilfe eines Systems von äußeren Magnetspulen erreicht wird. |
| **TOKAMAK** | ringförmige Einschlussform des Plasmas. Äußere Magnetspulen und ein im Plasma selbst fließender elektrischer Strom erzeugen sich überlagernde Magnetfelder. |
| **Tripelprodukt** | Produkt aus Ionendichte, Einschlusszeit und Ionentemperatur. Für ein selbsttätiges Brennen des Plasmas muss das Tripelprodukt etwa den Wert $10^{22}$ $m^{-3}$ s×keV erreichen. |
| **Tritium** | schweres Wasserstoffisotop $^3$H, das als Brennstoff für Fusionskraftwerke infrage kommt. |
| **WEC** | World Energy Council (Weltenergierat) |

Druck: MuK. Medien- und Kommunikations GmbH, Berlin
Vertrieb: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 13 20, 53003 Bonn, Telefon: 02 28 / 3 82 08 40, Telefax: 02 28 / 3 82 08 44
ISSN 0722-8333